

VŠB – Technická univerzita Ostrava

Fakulta strojní

Katedra obrábění a montáže

**Sledování elektrického odporu odporové vrstvy
inteligentního nástroje**

Monitoring Electrical Resistance of Resistor Layer of
Intelligent Tools

Student:

Václav Král

Vedoucí bakalářské práce:

Ing. Jiří Kratochvíl, Ph.D.

Ostrava 2013

Zadání bakalářské práce

Student: **Václav Král**
Studijní program: B2341 Strojírenství
Studijní obor: 2303R002 Strojírenská technologie
Téma: Sledování elektrického odporu odporové vrstvy inteligentního nástroje
Monitoring Electrical Resistance of Resistor Layer of Intelligent Tools

Zásady pro vypracování:

1. Úvod.
2. Teoretický rozbor problematiky.
3. Zpracování naměřených hodnot.
4. Vyhodnocení experimentu.
5. Závěr.

Seznam doporučené odborné literatury:

- [1] KOCMAN, K.; PROKOP, J. *Technologie obrábění*. Brno : Akademické nakladatelství CERM s.r.o. Brno. 2001, 270 s. ISBN 80-214-1996-2.
[2] VASILKO, K.; NOVÁK-MARCINČIN, J.; HAVRILA, M. *Výrobné inženýrství*. Prešov : Datapress Prešov. 2003, 424 s. ISBN 80-7099-995-0.
[3] NESLUŠAN, M.; TUREK, S.; BRYCHTA, J.; ČEP, R.; TABAČEK, M. *Experimentálne metódy v trieskovom obrábání*. Žilina : EDIS Žilina, 2007. s. 343. ISBN 978-80-8070-711-8.
[4] HUMÁR, A. *Slinuté karbidy a řezná keramika pro obrábění*. Brno : CCB, s.r.o. Brno, 1995. 265 s. ISBN 80-85825-10-4.

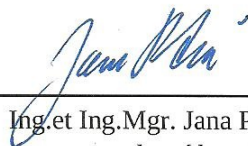
Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

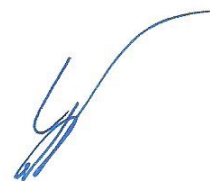
Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Jiří Kratochvíl, Ph.D.**

Datum zadání: 14.12.2012

Datum odevzdání: 20.05.2013



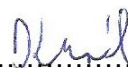

Ing. et Ing. Mgr. Jana Petřů, Ph.D.
vedoucí katedry


doc. Ing. Ivo Hlavatý, Ph.D.
děkan fakulty

Místopřísežné prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou bakalářskou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě 16. 5. 2013



.....

podpis studenta

Prohlašuji, že

- jsem byl seznámen s tím, že na moji diplomovou (bakalářskou) práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména § 35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a § 60 – školní dílo.
- beru na vědomí, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen „VŠB-TUO“) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě diplomovou (bakalářskou) práci užít (§ 35 odst. 3).
- souhlasím s tím, že bakalářská práce bude v elektronické podobě uložena v Ústřední knihovně VŠB-TUO k nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího bakalářské práce. Souhlasím s tím, že údaje o kvalifikační práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO.
- bylo sjednáno, že s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona.
- bylo sjednáno, že užít své dílo – bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- beru na vědomí, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě: 16. 5. 2013


.....
podpis studenta

Jméno a příjmení autora práce:

Václav Král

Adresa trvalého pobytu autora práce:

Vesník I

Lukov 763 17

Anotace bakalářské práce

KRÁL, Václav. *Sledování elektrického odporu odporové vrstvy inteligentního nástroje*. Katedra obrábění a montáže, Fakulta strojní VŠB – Technická univerzita Ostrava, 2013, 43s. Bakalářská práce.

Vedoucí práce: Ing. Jiří Kratochvíl, Ph.D.

Tato bakalářská práce se zabývá sledováním elektrického odporu odporové vrstvy vyměnitelné břitové destičky z řezné keramiky. V teoretické části práce je zpracovaná problematika řezné keramiky, opotřebení nástroje a elektrického odporu. V hlavní části je popsán samotný experiment a grafické zpracování naměřených výsledků a samotné vyhodnocení dat. V závěru jsou pak shrnuty všechny zjištěné poznatky.

Annotation of Bachelor Thesis

KRÁL, Václav. *Monitoring Electrical Resistance of Resistor Layer of Intelligent Tools*. Department of Working and Assembly, Faculty of Mechanical Engineering VŠB – Technical University of Ostrava, 2013, 43 p. *Bachelor Thesis*

Thesis head: Ing. Jiří Kratochvíl, Ph.D.

This thesis deals with monitoring the electrical resistance of the resistor layer of the insert cutting ceramics. The first part is treated the theory of the ceramic cutting, tool wear, and electrical resistance. In the second part of the experiment is processed. He confirmed that increasing the wear factor increases the electrical resistance. If the electrical resistance increases by several tens of ohms can be concluded that inserts reached wear and need replace it.

Obsah

Seznam použitých značek a symbolů	8
1 Úvod	9
2 Řezná keramika.....	10
2.1 Historický vývoj řezné keramiky	10
2.2 Rozdělení řezné keramiky	11
2.2.1 Čistá keramika.....	11
2.2.2 Polosměsná keramika	12
2.2.3 Směsná keramika.....	12
2.2.4 Vyztužená keramika	12
2.2.5 Nitridická keramika	13
2.3 Výroba řezné keramiky.....	14
2.3.1 Obecný postup výroby keramických materiálů.....	14
3 Opotřebení.....	15
3.1 Princip.....	15
3.2 Hlavní faktory ovlivňující opotřebení.....	15
3.3 Základní mechanismy opotřebení bříty.....	16
3.4 Typy opotřebení	17
3.4.1 Opotřebení ve tvaru žlábků na čele bříty	17
3.4.2 Plastická deformace bříty	17
3.4.3 Opotřebení ve tvaru vrubu na hřbetě bříty	17
3.4.4 Hřebenovité trhliny na ostří.....	18
3.4.5 Vydrolování ostří	18
3.4.6 Lom bříty nástroje.....	19
3.4.7 Tvorba nárůstku	19
3.5 Kritéria opotřebení.....	20
3.6 Experimentální měření opotřebení	20
3.6.1 Metody zjišťování otupení obráběcího nástroje	21
4 Elektrický odpor.....	22
4.1 Odpor vodiče závisí.....	22
4.2 Závislost odporu vodiče na teplotě	23
5 Rozbor experimentu	24
5.1 Použitý stroj	24
5.2 Držák	25
5.3 Nástroj	25
5.4 Přístroj pro měření opotřebení.....	26

5.5 Záznamové zařízení	26
5.6 Obráběný materiál.....	27
5.7 Popis experimentu	27
6 Vyhodnocení experimentu	28
6.1 Obrábění břitem číslo 1	28
6.2 Obrábění břitem číslo 2	30
6.3 Obrábění břitem číslo 3	32
6.4 Obrábění břitem číslo 4	34
6.5 Obrábění břitem číslo 5	35
6.6 Obrábění břitem číslo 6	37
7 Závěr	41
Seznam použité literatury.....	43

Seznam použitých značek a symbolů

Al_2O_3	oxid hlinitý	[-]
C	uhlík	[-]
D	průměr polotovaru	[mm]
I	elektrický proud	[A]
KB	šířka žlábků	[mm]
KF	vzdálenost výmolu od čela	[mm]
KM	střední vzdálenost žlábků	[mm]
KT	hloubka žlábků na čele	[mm]
L	délka polotovaru	[mm]
Mn	mangan	[-]
R	odpor vodiče	[Ω]
R_0	odpor vodiče při počáteční teplotě	[-]
S	průřez vodiče	[m ²]
SiC	karbid křemíku	[-]
SiO_2	oxid křemičitý	[-]
Si_3N_4	nitrid křemičitý	[-]
TiC	karbid titanu	[-]
TiN	nitrid titanu	[-]
U	elektrické napětí	[V]
VB	opotřebení na hřbetě	[mm]
VB_{max}	maximální opotřebení	[mm]
VC	opotřebení v oblasti špičky nástroje	[mm]
VN	opotřebení ve formě vrubu	[mm]
ZrO_2	oxid zirkoničitý	[-]
a_p	hloubka řezu	[mm]
d	obráběný průměr	[mm]
f	posuv	[mm]
n	otáčky	[min ⁻¹]
l	délka vodiče	[m]
v_c	řežná rychlost	[m.min ⁻¹]
v_f	posuvová rychlost	[mm.min ⁻¹]
α	teplotní součinitel elektrického odporu	[K ⁻¹]
ρ	rezistivita materiálu	[Ωm]
Δt	rozdíl teplot	[K]

1. Úvod

V dnešní době se ve strojírenské výrobě klade důraz na efektivnější výrobu. Proto se využívají bezobslužné systémy výroby, díky kterým se snižují výrobní náklady. Dalším kritériem pro snížení výrobních nákladů je zavádění nových dokonalejších technologií, které by zároveň neměly být ekonomicky nenáročné.

V této práci se zabývám sledováním elektrického odporu inteligentním nástrojem konkrétně řeznou keramikou, u které je vývoj neustále dopředu. Důkazem tohoto vývoje je vznik vyměnitelné břitové destičky, na které je nanesená odporová vrstva. Tyto destičky jsou velice jednoduché a díky tomu se můžou stát dobrým řešením při volbě obráběcího nástroje, protože můžeme přesně zjistit velikost opotřebení a otupení nástroje během obrábění a tím i určit, kdy dojde ke konci technické životnosti vylomením. To zabrání předčasné výměně břitové destičky a ta by se poté využívala po celou dobu její trvanlivosti. Zkrátí se i vedlejší časy z důvodu méně časté výměny nástroje.

2. Řezná keramika

Moderní definicí je keramika obecně charakterizována jako převážně krystalický materiál, jehož hlavní složkou jsou anorganické sloučeniny nekovového charakteru [4].

V této definici je zahrnuta nejen tradiční keramika jako např. porcelán, cihly, cement, ale i řezné a brousící materiály a také řada tzv. “nových” (speciálních, strojírenských, průmyslových) keramických látek. Pro novou keramiku je charakteristické to, že je vyráběna z poměrně čistých surovin jako keramika syntetická se zrní malých rozměrů (často pod $1\mu\text{m}$). Většina látek zařazovaných pod pojmem „nová keramika“ jsou látky krystalické na rozdíl od tradiční keramiky (porcelán, glazury), která obsahuje i značný podíl skelné (amorfní) fáze. Keramické látky jsou vázány meziatomovými vazbami iontovými a kovalentními, obvykle se vyskytují oba typy vazeb současně. V krystalické struktuře převažují složité mřížky kubické a hexagonální. [1]

Řezná keramika se vyrábí ve formě destiček, které mohou být různých geometrických tvarů. Destičky se upínají mechanicky na řezné části nástroje. Díky tomu jsou snadno vyměnitelné a po opotřebení se vyřazují.

Nástroje s destičkami z řezné keramiky jsou vhodné pro použití ve velkosériové případně v hromadné výrobě z důvodu dosažení maximální efektivity při náročnějších podmínkách obrábění, než umožňují nástroje se slinutými karbidy. Mezi výhody patří vysoká tvrdost ostří i za teploty 1200°C , vysoká chemická stabilita, odolnost proti opotřebení, mechanickým namáháním, chemickým vlivům a korozi. Patří do skupiny velmi výkonných řezných materiálů, ale podmínkou pro jejich úspěšné nasazení ve strojírenské výrobě je dodržení určitých zásad. Mezi ty patří zejména vysoká tuhost soustavy stroj – nástroj – obrobek, pevné a spolehlivé upnutí obrobku, zvolení vhodného tvaru a velikosti destičky, provedení sražení náběhových hran na obrobku, atd. [5]

2.1 Historický vývoj řezné keramiky

Poprvé byl nástroj z keramiky použit už v době kamenné. V té době člověk používal pískovcové kotouče, které obsahovaly velké množství SiO_2 a ty jako jediné sloužily dlouhou dobu k ostření nožů a nástrojů. [2]

První keramický materiál na bázi Al_2O_3 , který se dal použít jako řezný nástroj, byl vyvinut v období II. světové války německou firmou Degussa a měla to být náhrada

slinutých karbidů WC-Co. Ale kvůli vysoké křehkosti byl používán na nepřerušovaný řez a k širšímu rozšíření nedošlo. Díky intenzivního výzkumu koncem 50. let byly úspěšně aplikovány keramické materiály na této bázi. Nástroje byly složeny z velkého množství oxidu hlinitého a malého množství slinovacích přísad. Velkému rozšíření bránil nedostatek výkonných strojů s potřebným výkonem a rozsahem otáček vřetene. [2]

Na začátku 70. let byla vyvinuta keramika typu $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{TiC}$. Ta měla zlepšit odolnost proti vydrolování a spolehlivost. Dnes je to nejrozšířenější typ řezné keramiky. Proces slinování se postupně změnil z vysokoteplotního lisování na vysokoteplotní izostatické lisování. To mělo za následek snížení ceny nástroje a zvýšení produktivity výroby. [2]

V polovině 80. let byly vyvinuty kompozity Al_2O_3 vyztužené vlákny whickery (SiC). Karbid křemíku má tendenci reagovat se slitinami železa a tím vzniká větší opotřebení nástroje, ale tímto vyztužením vlákny se výrazně zvýší odolnost proti vydrolování a vylamování ostří. Díky tomu má nástroj vynikající řezné výkony při obrábění superslitin. Počátkem 80. let se na trhu objevují i první keramické nástroje na bázi Si_3N_4 . [2]

2.2 Rozdělení řezné keramiky

Rozdělení řezné keramiky se od sebe liší, protože dodnes neexistuje žádná norma, podle které by se rozdělovala. Proto můžeme řeznou keramiku například rozdělit podle chemického složení:

Oxidická keramika: - čistá (99,5% Al_2O_3)

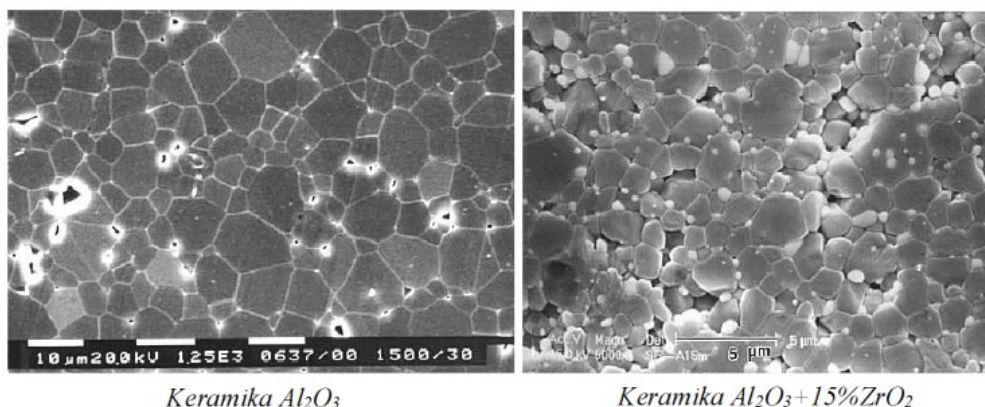
- polosměsná ($\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{ZrO}_3$, $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{ZrO}_2 + \text{CoO}$)
- směsná ($\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{TiC}$, $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{ZrO}_2 + \text{TiC}$, $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{TiC} + \text{TiN}$)
- vyztužená (oxidická nebo nitridová keramika vyztužená pomocí SiC nebo Si_3N_4)

Nitridová keramika: (Si_3N_4 , $\text{Si}_3\text{N}_4 + \text{TiN}$)

2.2.1 Čistá keramika (obr. 2.1 vlevo)

Obsahuje až 99,9% kysličníku hlinitého Al_2O_3 . Má nízkou houževnatost a odolnost proti teplotním rázům. Zároveň je ale vysoce odolná proti opotřebení a má vynikající teplotní stálost. Materiál se lisuje za studena a slinuje se při teplotách kolem 1600°C .

Používá se ve většině případů na dokončovací soustružení šedé litiny, nízkolegovaných a uhlíkových ocelí. Řezná rychlost přesahuje $100 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$. [6]



Obr. 2.1 Struktura čisté a polosměsná keramika [1]

2.2.2 Polosměsná keramika (obr. 2.1 vpravo)

Vzniká přidáním různých přísad do čisté keramiky. Nejčastější přísadou bývá oxid zirkoničitý. Nejčastější obsah této složky bývá 15 – 20%. Tato keramika má vyšší pevnost a houževnatost. Díky tomu se snižuje i náchylnost proti lomu. [7]

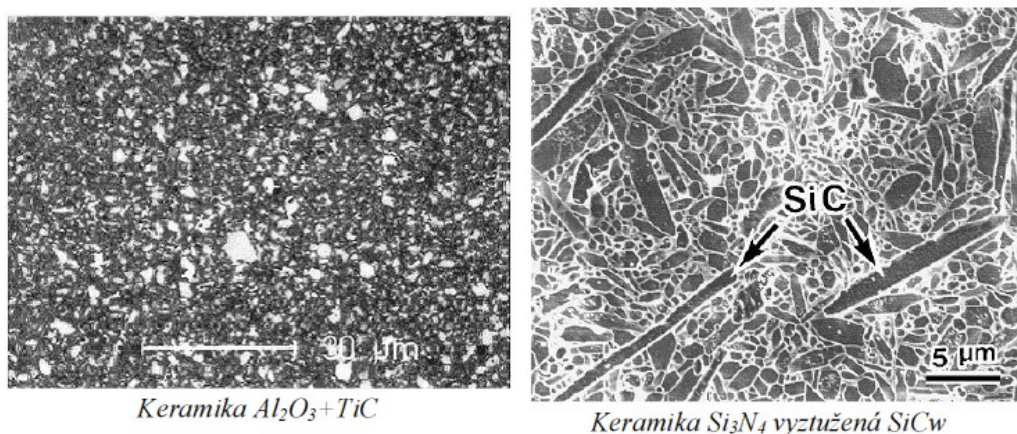
2.2.3 Směsná keramika (obr. 2.2 vlevo)

Tato keramika se skládá ze směsi oxidu hlinitého Al_2O_3 a neolitických materiálů TiC, TiN a dalších. Objem přísadových materiálů je asi 20 – 40%. Tento materiál má v porovnání s čistou keramikou lepší tepelnou vodivost, odolnost proti tepelným rázům a vyšší pevnost v ohybu. Přísady totiž spolu s ZrO_2 absorbují energii v oblastech tahového napětí na celé trhliny a tím zvyšují houževnatost keramiky. Destičky se obvykle vyrábí lisováním za tepla a mají černou barvu. Jsou doporučovány pro frézování šedé litiny a oceli, pro dokončovací soustružení a jemné soustružení ocelí cementačních, zušlechťených a tvrdé litiny. [6]

2.2.4 Vyztužená keramika (obr. 2.2 vpravo)

Keramika na bázi oxidu hlinitého a jedná se o zcela nový rezný materiál. Jeho vlastnosti se vymykají dosud uváděným poznatkům. Tento materiál je možné s ohledem na jeho vysokou mez pevnosti používat optimálně. Také se může nazývat keramika zesílená wiskerem – tento název je odvozen od vlákna krystalu, který se nazývá wisker. Toto vlákno má průměr pouze cca $1 \mu\text{m}$ a délku více než $20 \mu\text{m}$ a podíl wiskeru v destičce činí cca 30 %. Je z karbidu křemíku a má velmi vysokou pevnost. Také podstatně zvyšuje houževnatost, pevnost v tahu, odolnost proti

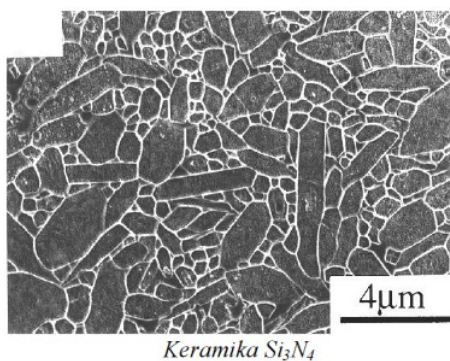
tepelnému šoku a současně také tvrdost zatepla a odolnost proti opotřebení. Vyrábí se lisováním zatepla a díky tomu dosáhneme v břitové destičce stejnoměrného rozptýlení whiskerů. Barva destičky je zelená. Používá se na obrábění žáruvzdorných slitin, kalené oceli, šedé litiny a hlavně při obrábění přerušovaným řezem. [6]



Obr. 2.2 Struktura směsné a vyztužená keramika [1]

2.2.5 Nitridická keramika (obr. 2.3)

Keramika na bázi nitridu křemíku má relativně vysokou odolnost proti mechanickému porušení břitu a je vhodná pro dokončování i hrubování šedé litiny. Je také vhodná pro přerušované řezy, odolná proti teplotním rázům, soustružení žárovevých slitin na bázi niklu a též pro kolísající hloubku řezu. Vzhledem k nižší chemické stabilitě není vhodná pro obrábění oceli. Keramika na bázi Si_3N_4 si zachovává vysoký stupeň tvrdosti za tepla při teplotách, které slinutý karbid nesnáší. Tento materiál rezných destiček je doporučován pro obrábění šedé litiny za sucha i při chlazení, reznými rychlostmi až $400 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$. Slinutý nitrid křemíku je vyroben slinováním Si_3N_4 se zhutňovacími přísadami při teplotách $1600 - 1800^\circ\text{C}$ v dusíkové atmosféře o tlaku $1 - 10 \text{ MPa}$. [6]



Obr. 2.3 Struktura nitridické keramiky [1]

2.3 Výroba řezné keramiky

Proces výroby kompaktních keramických součástí (a tedy i vyměnitelných břitových destiček pro řezné nástroje) je velmi podobný procesu výroby součástí ze slinutých karbidů a cermetů (např. příprava práškové směsi, mletí, míchání, tvarování, sušení, předsunování, slinování a úpravy povrchu). Podstatný rozdíl je ale v tom, že keramické výrobky neobsahují žádný materiál, jehož funkcí by bylo spojení zrn tvrdé fáze do jednolitého tělesa (jako je např. u slinutých karbidů, kde pojivem je kobalt, nebo u cermetů, kde je pojivem převážně nikl). Tato skutečnost celou výrobu keramických materiálů výrazně znesnadňuje a klade velmi vysoké nároky jak na výrobní zařízení, tak zejména na dodržení všech předepsaných parametrů technologického postupu výroby. [4]

Vývoj mikrostruktury a sledovatelnost keramických materiálů je možno ovlivnit přidáním přísad. Tyto přísady v průběhu slinování vytváření kapalnou fází. Tímto způsobem lze dosáhnout hustějšího uspořádání částic a rychlejšího i lepšího zhuštění výrobku. Velikost zrn jednotlivých keramických prášků a aditiv se pohybuje kolem 200 nm. [2]

2.3.1 Obecný postup výroby keramických materiálů:

- příprava práškové směsi,
- mletí,
- míchání,
- tvarování,
- sušení,
- předslinování,
- slinování,
- úpravy povrchu.

3. Opotřebení

3.1 Princip

Opotřebení je běžným důsledkem funkce všech strojních součástí, které jsou ve vzájemném kontaktu a relativním pohybu. Při obrábění dochází v důsledku řezného procesu k relativnímu pohybu nástroj-obrobek a nástroj-třísky, i ke kontaktu nástroje s obrobkem (na hlavním a vedlejším hřbetu a špičce nástroje) a odcházející třískou (na čele nástroje), což vede k opotřebení nástroje. [1]

3.2 Hlavní faktory ovlivňující opotřebení

Řezná rychlost (v_c):

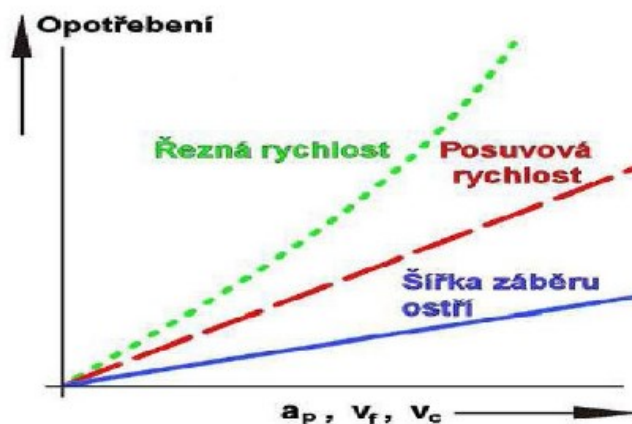
Čím větší použijeme řeznou rychlost při obrábění, tím dříve se opotřebí břit nástroje. Tento faktor nejvíce ovlivňuje opotřebení břitu nástroje. To lze ověřit na obr. 3.1

Posuvová rychlost (v_f):

Posuvová rychlost má menší vliv na opotřebení břitu nástroje než řezná rychlost a opotřebení se projeví převážně na hřbetu, díky pohybu, který zatlačuje hřbet do samotného obrobku. (obr. 3.1)

Šířka záběru ostří a_p :

Při zvětšování šířky záběru se také zvětšuje hloubka řezu a tím se zvětší plocha třísky. Díky tomuto jevu má tento faktor nejmenší vliv na opotřebení břitu nástroje. (Obr. 3.1)



Obr. 3.1 Vliv řezných podmínek na opotřebení

Mezi další faktory, které ovlivňují opotřebení bříty, patří:

- teplota řezání,
- obráběný materiál,
- nástrojový materiál,
- jakost ostří,
- řezná geometrie.

3.3 Základní mechanismy opotřebení bříty

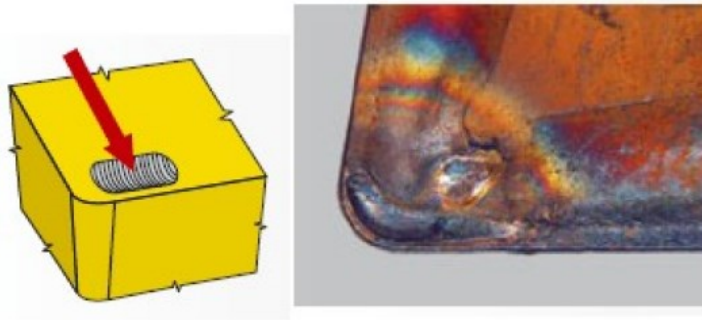
- abrazivní opotřebení – Brusný otěr vlivem tvrdých mikročástic obráběného materiálu i mikročástic uvolněných z nástroje. [2]
- adhezní opotřebení – Vznik a okamžité následné porušování mikrosvarových spojů na stýkajících se vrcholcích nerovností čela a třísky, v důsledku vysokých teplot a tlaků, chemické příbuznosti materiálu a kovově čistých povrchů. [2]
- difuzní opotřebení – Migrace atomů z obráběného materiálu do nástrojového materiálu a naopak, a z ní vyplývající vytváření nežádoucích chemických sloučenin ve struktuře nástroje. [2]
- oxidační opotřebení – Důsledek vysokého tepelného a mechanického zatížení, kumulovaného v čase. [2]
- křehký lom – Důsledek vysokého tepelného a mechanického zatížení, např. přerušovaný řez, nehomogenity a vměstky v obráběném materiálu, atd. [2]

První dva mechanismy opotřebení jsou většinou označovány jako fyzikální, druhé dva jako chemické a všechny čtyři působí v průběhu času plynule, s tím, že časový okamžik začátku jejich působení nemusí být vždy shodný. Plastická deformace a křehký lom jsou narozdíl tomu mechanismy, které působí náhle, v daném okamžiku a obvykle způsobí okamžité ukončení činnosti nástroje (náhlá změna tvaru bříty nástroje, lavinové opotřebení nebo ulomení špičky). Hřbet nástroje se opotřebovává především v důsledku abraze a oxidace, čelo v důsledku adheze, difúze, abraze a oxidace. [2]

3.4 Typy opotřebení

3.4.1 Opotřebení ve tvaru žlábků na čele bříty (obr. 3.2)

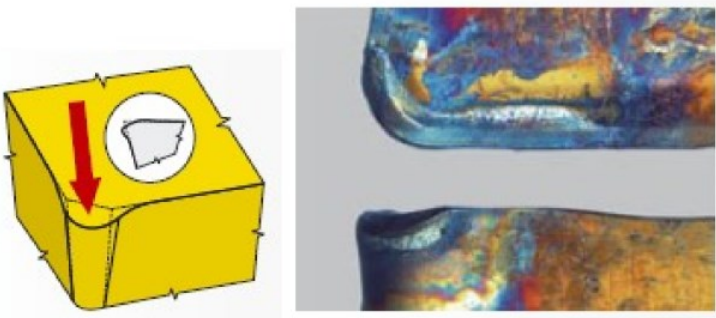
Je důsledkem působení mechanismu difuzního opotřebení a abraze. Žlábek vzniká částečně úběrem materiálu nástroje vyvolaným brousícím pochodem, který způsobují tvrdé částice obsažené v materiálu obrobku, ale hlavně difuzní vodík v místě bříty s nevyšší teplotou, tzn. v kontaktním místě mezi třískou a materiálem bříty. [7]



Obr. 3.2 Opotřebení ve tvaru žlábků na čele bříty [8]

3.4.2 Plastická deformace bříty (obr. 3.3)

Vzniká působením kombinace vysokých teplot a řezných tlaků na bříty. Plastická deformace bříty ještě více zvyšuje teploty a má za následek změnu geometrie bříty a změny v odchodu třísek. Plastickou deformaci bříty lze zmenšit použitím správného zaoblení ostří a volbou vhodné geometrie bříty. [7]

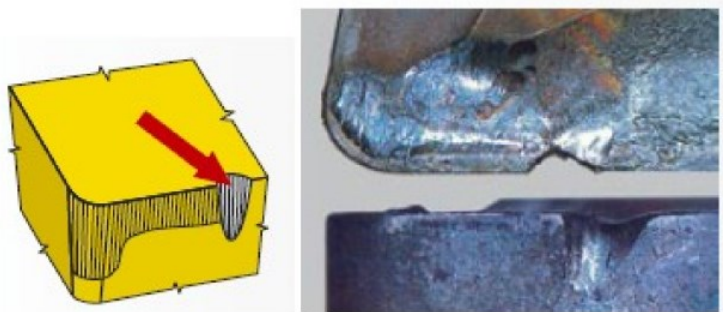


Obr. 3.3 Plastická deformace bříty [8]

3.4.3 Opotřebení ve tvaru vrubu na hřbetě bříty (obr. 3.4)

Patří k typickým adhezním opotřebením, může však stejně dobře souviset s jevem oxidačního opotřebení. Vruby vznikají v místě kontaktu bříty s bokem třísky.

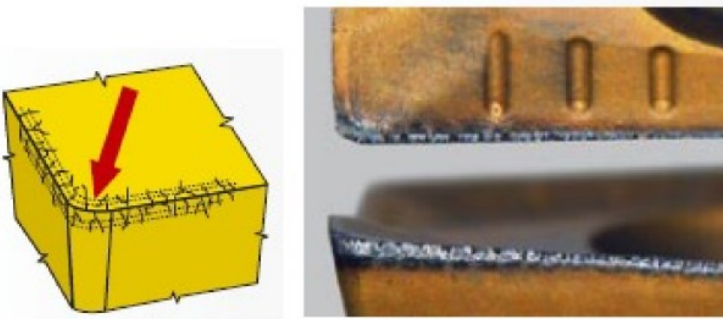
Toto opotřebení se omezuje přesně na to místo, kudy proniká vzduch do oblasti obrábění. Velké opotřebení hřbetu ve tvaru vrubu ovlivňuje utváření třísky a může dojít k lomu destičky. [7]



Obr. 3.4 Opotřebení ve tvaru vrubu na hřbetě bříty [8]

3.4.4 Hřbenovité trhliny na ostří (obr. 3.5)

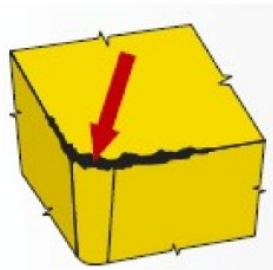
Jsou formou únavového opotřebení, které vzniká tepelnými šoky. Hlavně změna teplot při frézování často vede k tomuto druhu opotřebení. Trhliny se tvoří kolmo na ostří, následně se mohou částice řezného materiálu vylamovat a vyvolat tak náhlý lom bříty. [7]



Obr. 3.5 Hřbenovité trhliny [8]

3.4.5 Vydrolování ostří (obr. 3.6)

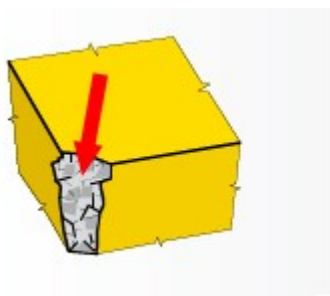
Je formou opotřebení, při kterém se břit vydroluje. Toto opotřebení je způsobeno špičkami zatížení a vede k tomu, že drobné částčky řezného materiálu se začnou oddělovat z povrchu bříty. [7]



Obr. 3.6 Vydrolování ostří (mikrovyštipování) [8]

3.4.6 Lom břitu nástroje (obr. 3.7)

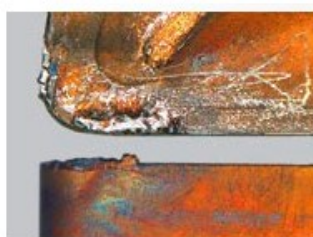
Představuje náhlou poruchu a okamžitý konec jeho technického života. Totální lom je často velmi nebezpečný a mělo by se mu za všech okolností zabránit. Křehký lom může být způsobený různými faktory, často je zvolený materiál málo houževnatý, aby mohl zvládnout všechny požadavky na obrábění. [7]



Obr. 3.7 Lom břitu nástroje [8]

3.4.7 Tvorba nárůstku (obr. 3.8)

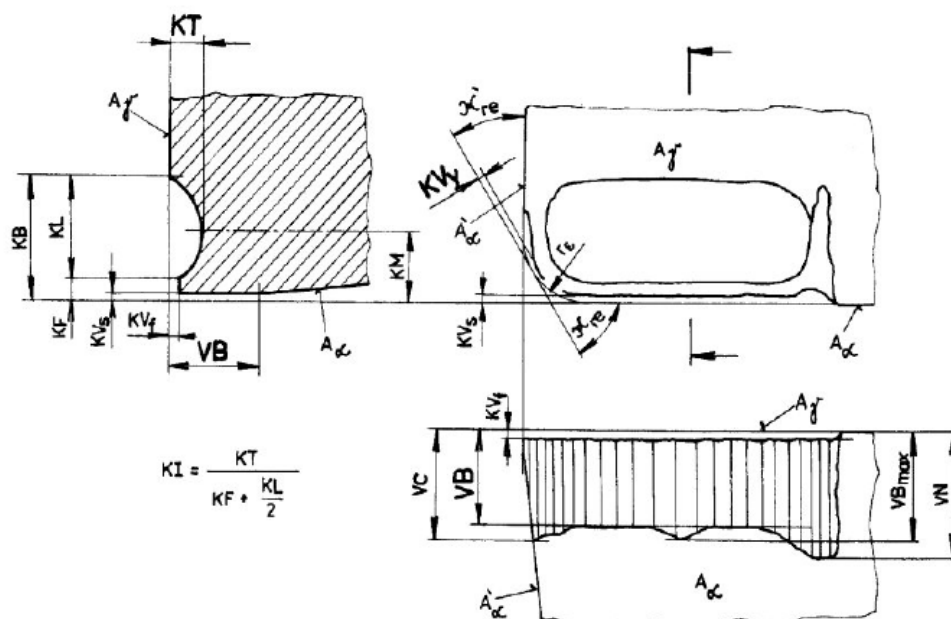
Tvorba nárůstku je v převážné většině případů fenoménem, vztahujícím se k teplotám a rezným rychlostem. Může však být způsobena i odlupováním vrstev v místě břitu nebo jinými formami opotřebení. Mimo změny geometrie působí tato forma opotřebení negativně, protože se částice materiálu mohou odlomit. Negativním důsledkem je zhoršený obrobený povrch součásti. Nadměrná tvorba nárůstku může vést až k lomu. [8]



Obr. 3.8 Vydrolování ostří (mikrovyštipování) [8]

3.5 Kritéria opotřebení

Kritéria, kterými je opotřebení kvantifikováno, jsou znázorněna v obr. 3.9.



Obr. 3.9 Kritéria opotřebení řezného nástroje dle ČSN ISO 3685 [1]

- VB – opotřebení na hřbetě,
- VC – opotřebení v oblasti špičky nástroje,
- VN – opotřebení ve formě vrubu,
- VB_{max} – opotřebení maximální,
- KT – hloubka žlábků na čele,
- KF – vzdálenost výmolu od čela,
- KM – střední vzdálenost žlábků,
- KB – šířka žlábků.

3.6 Experimentální měření opotřebení

Experimentální studium opotřebení a otupování bříty je základem pro určení empirických údajů pro optimalizaci řezných parametrů respektive trvanlivosti bříty. Významná část výzkumu byla v poslední době zaměřena přímo na sledování a měření opotřebení nástroje, protože stav výsledného obrobku plně závisí na stavu samotného nástroje. Důvodem pro tento výzkum je zavádění automatizovaných pružných výrobních systémů a adaptivní kontroly obráběcích strojů. Nevýhodami měření některých metod jsou negativní děje, které musí být překlenuty: [3]

- odchod třísek z místa řezu (navíjení na obrobek i nástroj, lámání, zničení nebo poškození snímače),
- procesní kapaliny,
- vibrace a chvění stroje,
- doba odezvy, která bývá poměrně dlouhá,
- nízká citlivost a měnící se fyzikální vlastnosti materiálu nástroje a obrobku.

3.6.1 Metody zjišťování otupení obráběcího nástroje

Přímé metody

Přímé metody je těžké aplikovat, protože plochy, které se otupují, jsou nedostupné pro měřicí přístroje. Poté je nutné obrábění přerušit a to ovlivňuje charakter otupení při dalších etapách experimentu. Kromě toho se ve většině případů nástroj snímá z nožového držáku, což přináší změny podmínek obrábění při dalším upnutí a ustavení. [2]

Mezi přímé metody patří:

- metoda váhová (hmotnostní)
- metoda radioaktivních izotopu
- metoda mikrometrická
- metoda optická (stínová)
- metoda nanesené odporové vrstvy

Nepřímé metody

Opírají se o některé znaky, které proces opotřebování doprovází a provádí se přímo při obrábění. Všechny tyto metody jsou pouze přibližné. [2]

Mezi nepřímé metody patří:

- vznik lesklého proužku na povrchu obrobku
- vzrůst složek síly řezání
- zvýšení potřebného výkonu řezání
- zvýšení teploty řezání
- vznik chvění nebo nežádoucího doprovodného zvuku
- změna barvy a tvaru třísky
- změna rozměru obrobku
- zhoršení drsnosti povrchu

4. Elektrický odpor

Je to fyzikální veličina charakterizující schopnost elektrických vodičů vést elektrický proud. Má vždy kladnou hodnotu. Velikost odporu závisí na kvalitě vodiče, proto čím kvalitnější vodič máme tím menší je elektrický odpor a naopak.

Elektrický odpor vodiče je přímo úměrný délce a nepřímo úměrný průřezu vodiče. Dále pak závisí na materiálu, ze kterého je vodič vyroben a teplotě vodiče. [9]

Závislost elektrického odporu na rozměrech a materiálu

$$R = \frac{\rho \cdot l}{S} [\Omega] \quad (4.1)$$

R = odpor vodiče	[Ω]
ρ = rezistivita materiálu	[Ωm]
l = délka vodiče	[m]
S = průřez vodiče	[m ²]

Ohmův zákon - je to vztah mezi napětím a proudem při konstantním odporu.

$$R = \frac{U}{I} [\Omega] \quad (4.2)$$

U = elektrické napětí [V]

I = elektrický proud [A]

Ohmův zákon platí pro obvody s lineárním odporem. Odpory mohou být i nelineární, například vlivem teplotní závislosti odporu, proto pro náš experiment neplatí.

4.1 Odpor vodiče závisí:

1. délce vodiče – l [m]

Čím delší máme vodič, tím více se sráží volné elektrony s atomy kovu a proto je větší elektrický odpor.

2. průřezu vodiče – S [m²]

Čím větší je průřez vodiče, tím méně volných elektronů projde jednotkovým průřezem a tudíž se méně sráží s atomy kovu. Z tohoto důvodu je elektrický odpor menší.

3. rezistivitě materiálu – ρ [Ωm]

Rezistivita udává odpor vodiče o průřezu 1m^2 na 1m délky vodiče při teplotě 20°C .

Rezistivitu různých materiálů najdeme v matematicko-fyzikálních tabulkách. [9]

4.2 Závislost odporu vodiče na teplotě

Pokud se zahřeje vodič, dojde ke zvýšení rozkmitu atomů kovu. Proto jsou srážky volných elektronů s atomy kovu častější. Tento jev se projeví na zvýšeném odporu vodiče.

Vliv teploty na odpor vodiče vyjadřuje tzv. teplotní součinitel odporu

$$R = R_0 \cdot (1 + \alpha \cdot \Delta t) [\Omega] \quad (4.3)$$

R = elektrický odpor vodiče [Ω]

R_0 = elektrický odpor vodiče při počáteční teplotě [Ω]

α = teplotní součinitel elektrického odporu [K^{-1}]

Δt = rozdíl teplot [K]

Teplotní součinitel elektrického odporu závisí na materiálu vodiče. U některých materiálů je kladný a některé zase záporný.

Kladný teplotní součinitel odporu

Pokud roste teplota, vzrůstá také odpor (většina kovů má kladný teplotní součinitel). Náš obráběný materiál použitý při experimentu má kladný teplotní součinitel a proto při rostoucí teplotě poroste i elektrický odpor.

Záporný teplotní součinitel odporu

Odpor se vzrůstající teplotou klesá (teplotní součinitel odporu mají uhlík a polovodičové materiály záporný)

Supravodivost

Vzniká u silně podchlazených kovů s kladným teplotním součinitelem, při teplotách, které se blíží 0 K (tj. -273°C). Při těchto teplotách náhle mizí jejich odpor a jejich vodivost je obrovská. [9]

5. Rozbor experimentu

5.1 Použitý stroj

Měření probíhalo na univerzálním soustruhu MAŠSTROJ TROJAN C11(obr. 5.1), který je vhodný pro provedení experimentu díky své dostatečné tuhosti. Parametry stroje jsou uvedeny v tabulce.



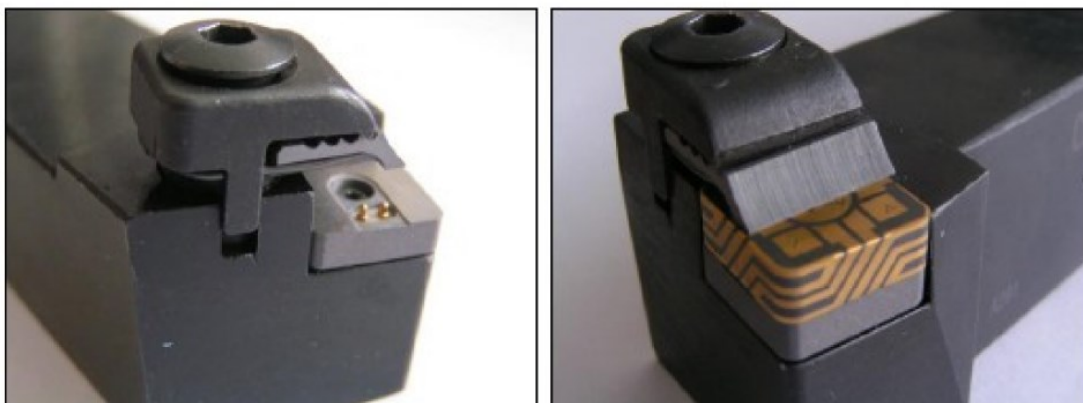
Obr. 5.1 Univerzálním soustruhu MAŠSTROJ TROJAN C11

Tab. 5.1 Pracovní rozsah stroje:

Popis	Hodnota
Vzdálenost hrotů koníka	1100 [mm]
Oběžný průměr nad ložiskem	500 [mm]
Oběžný průměr nad sklíčidlem	290 [mm]
Průměr sklíčidla	250/315 [mm]
Zdvih příčného suportu	270 [mm]
Zdvih podélného suportu	950 [mm]
Výkon hlavního motoru S1	15 [kW]

5.2 Držák

K upnutí břitové destičky byl použit speciální držák od firmy CERADDEX typu XCSRNR2525M-1207SEN (obr. 5.2). Tento typ nožového držáku je upraven tak, aby umožnil vedení elektrického signálu, a díky tomu můžeme měřit elektrický odpor při obrábění.



Obr. 5.2 Nástrojový držák

5.3 Nástroj

Při experimentu byla použita vyměnitelná břitová destička (obr. 5.3) vyrobená z řezné keramiky KS 6000, která je na bázi nitridu křemíku a na kterou byla nanесena odporová vrstva. Ta tvoří elektrický obvod, díky kterému můžeme měřit a následně zaznamenávat elektrický odpor. Destička je od známé firmy KYOCERA.



Obr. 5.3 Vyměnitelná břitová destička

5.4 Přístroj pro měření opotřebení

Pro měření míry opotřebení na vyměnitelné břitové destičce byl zvolen dílenský mikroskop (obr. 5.4) od firmy INTRACO MICRO spol. s.r.o.



Obr. 5.4 Dílenský mikroskop

5.5 Záznamové zařízení

Data, která byly naměřeny při obrábění, se zaznamenávaly pomocí univerzálního datalogeru ALMENO 2590-4S (obr. 5.5). Dataloger může zaznamenávat až 4 nezávislé veličiny, které se zaznamenávají po 30 setinách sekundy pomocí programu ALMENO AMR-Control 5.13 a ty se následně ukládají do textového souboru s příponou txt. Tyto textové soubory se dále můžou pomocí programu ALMENO 4.9 exportovat do programu Microsoft-Excel, pomocí kterého pak vytváříme potřebné grafy. Čidlo měří elektrický odpor v rozsahu 0-500 Ω .



Obr. 5.5 Dataloger ALMENO 2590-4S

5.6 Obráběný materiál

Pro obrábění byla vybrána ocel 17 601. Obsah prvků v %: 1,2 C, 12 Mn. Je to ocel manganová a patří podle použití ke konstrukčním legovaným ocelím. Používá se na kuchyňská zařízení, v oblasti chirurgie, na nádoby pro kyseliny a ventily motorů.

- kování 800 až 950°C,
- rozpouštěcí žíhání 1000 až 1050 °C,
- pozvolna ohřívat na 850 °C,
- dohřát na 1000 až 1050 °C,
- ochlazovat ve vodě.

Polotovar byl kruhového průřezu průměru $D=74,3$ mm a délce $L=440$ mm.

Materiál byl upnut pomocí tříčelistového sklíčidla a druhá strana musela být podepřena hrotem, který byl upnutý v pinole koníku, z důvodu omezení házení polotovaru.

5.7 Popis experimentu

Pro experiment byl použit jeden materiál (17 601). Při obrábění břitem číslo $1 \div 3$ vyměnitelnou břitovou destičkou se měnil posuv a snažili jsme se udržet řeznou rychlost konstantní. Protože se ale měnil obráběný průměr, řezná rychlost se také nepatrně změnila. Při obrábění břitem číslo $4 \div 6$ byla sledována změna elektrického odporu při změně řezné rychlosti a posuv zůstal konstantní. Hloubka odebírané třísky zůstala po celou dobu experimentu konstantní.

6. Vyhodnocení experimentu

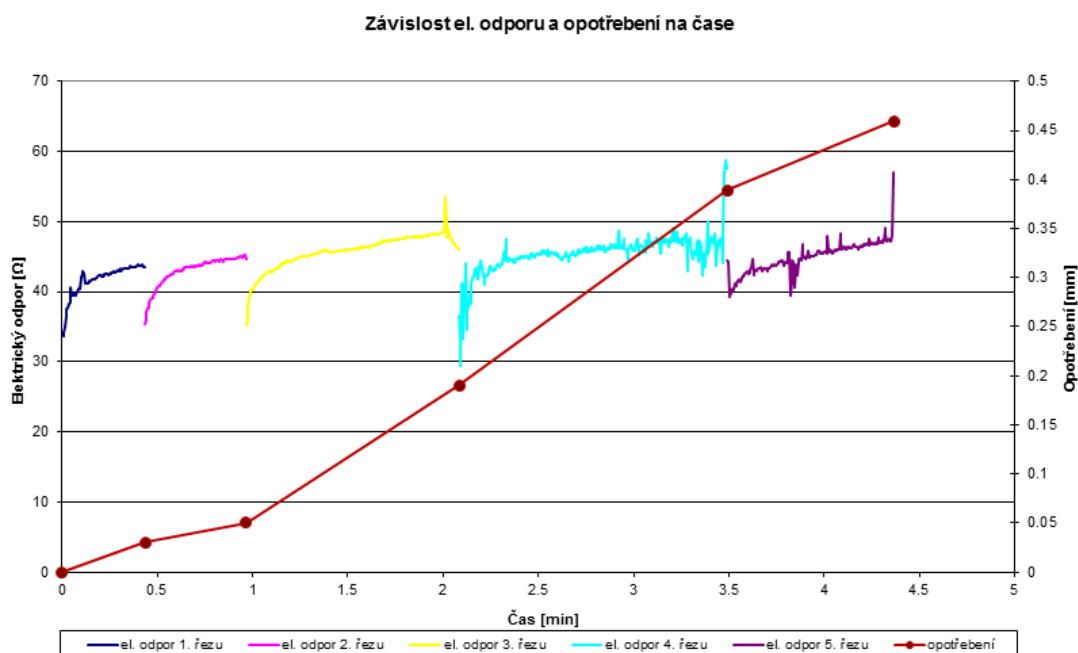
6.1 Obrábění břitem číslo 1

Tab. 6.1 Řezné podmínky při obrábění:

d [mm]	v_c [m.min ⁻¹]	f [mm]	a_p [mm]	n [min ⁻¹]
71,3	179,2	0,15	1,5	800

V řezu 5 se změnil průměr $d=68,3\text{mm}$.

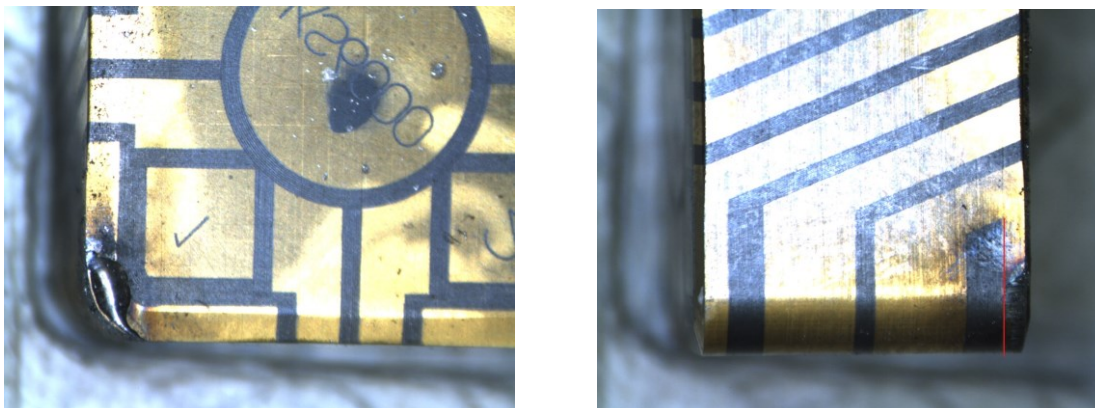
Při obrábění břitem číslo 1 bylo provedeno dohromady 5 řezů a nástroj urazil dráhu 524 mm s celkovou dobou v záběru 4,37 minuty. Na obr. 6.1 je znázorněn průběh elektrického odporu v jednotlivých řezech. U prvních dvou řezů ($L=52\div 116\text{mm}$) lze vidět, že nenastávají žádné výkmity elektrického odporu při vyjetí nástroje z řezu. Výkmity odporu se začínají objevovat až od 3. řezu ($L=250\text{ mm}$), kde výkmit odporu dosahuje skoro 55Ω . Ve 4. řezu ($L=419\text{mm}$) dosahoval výkmit už skoro 60Ω . Jedním z příčin výskytu výkmitu elektrické odporu je rychle se zvyšující opotřebení břitu nástroje. V 5. řezu pak nastalo přerušení odporové vrstvy.



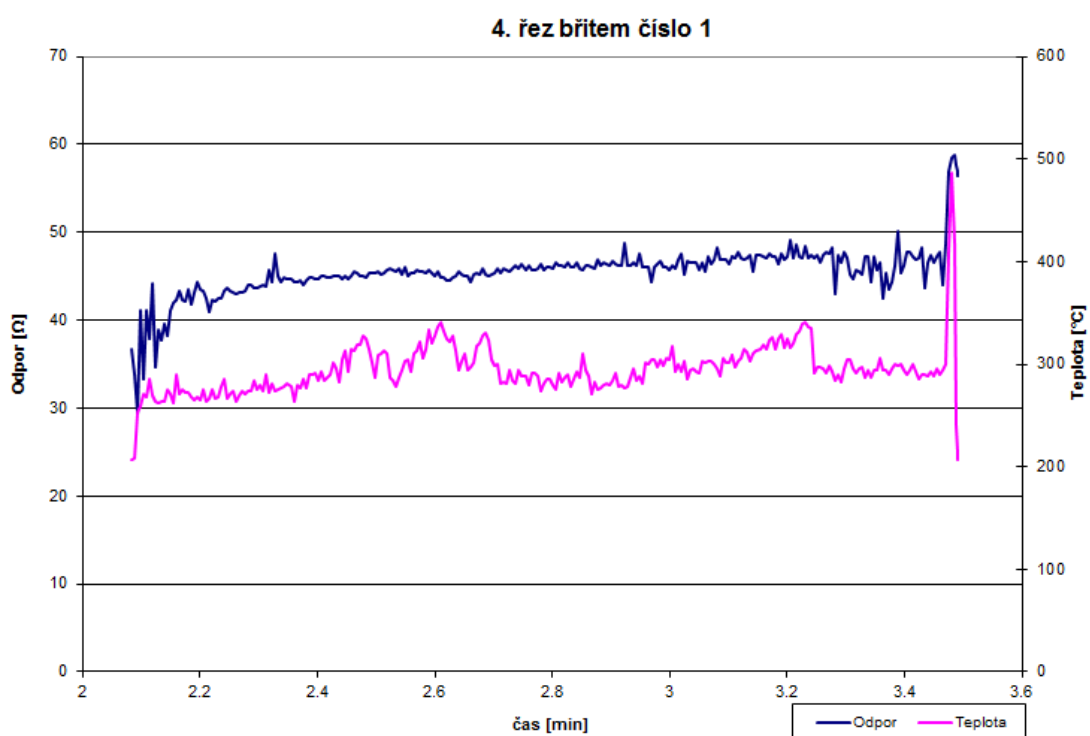
Obr. 6.1 Závislost odporu a opotřebení na čase při jednotlivých řezech

Na obr. 6.2 vlevo je zobrazeno opotřebení břitu a vzniklý žlábek na čele a vpravo opotřebení hlavního ostří na hřbetu, které je $VB=0.46\text{mm}$. Červená čára zakreslená

v obrázku značí dovolené kritérium opotřebení. Obrázek byl pořízen po přerušení odporové vrstvy.



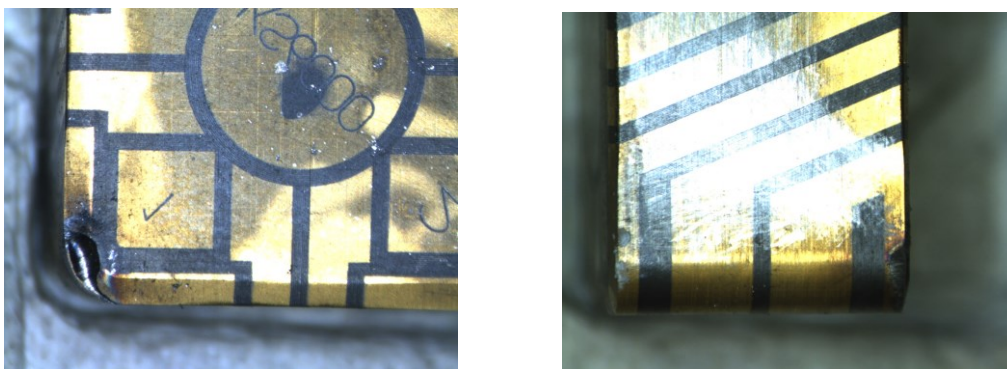
Obr. 6.2 Opotřebení břitu č. 1 po přerušení odporové vrstvy



Obr. 6.3 Závislost odporu a teploty na čase při obrábění břitem č. 1

Obr. 6.3 znázorňuje graf závislosti odporu a teploty na čase, který je vytvořen, protože během 4. řezu se rychle začalo zvyšovat opotřebení nástroje. Na začátku řezu bylo opotřebení břitu $VB=0.19\text{mm}$ a na konci obrábění byla naměřena hodnota opotřebení $VB=0.39\text{mm}$. V tomto grafu je možné vidět, že odpor se mění v závislosti na velikosti plochy odporové vrstvy, která je v daném okamžiku v kontaktu s obráběným materiálem. Kromě velikosti plochy odporové vrstvy závisí také odpor na teplotě odcházející třísky. Po ustálení teploty se také ustálil elektrický odpor. Při ukončení obrábění a výjezdu z místa řezu nastal mírný výkmit elektrického odporu,

ale také velký výkmit teploty, který dosáhl skoro 500°C. Vzniklé opotřebení břitu po 4. řezu je znázorněno na obr. 6.4.



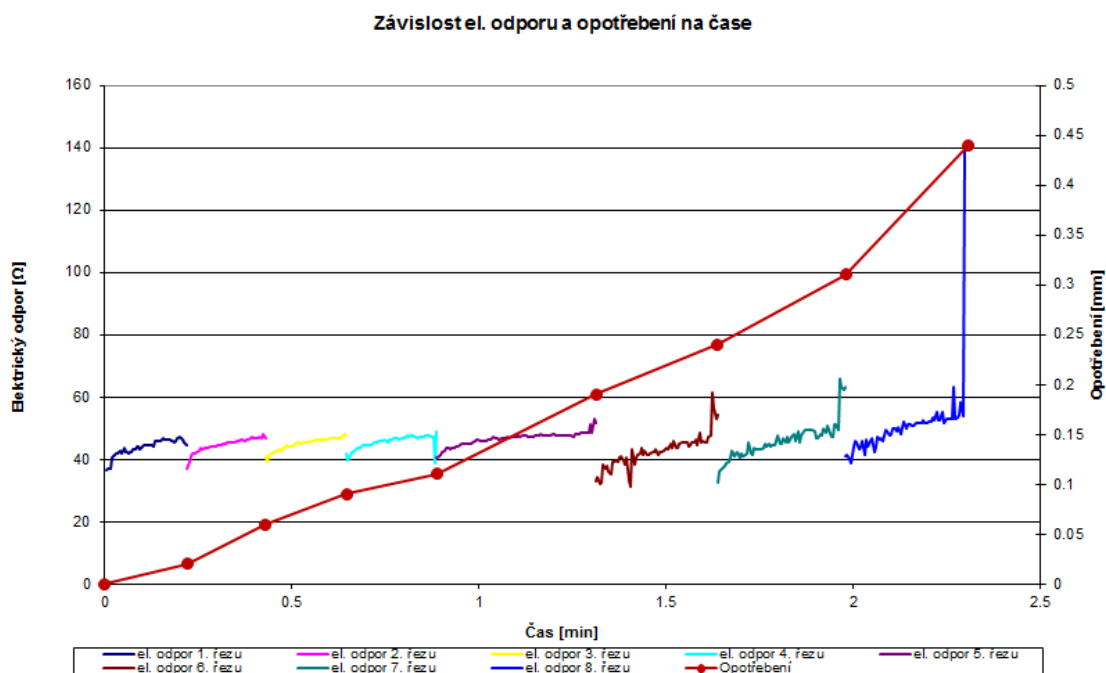
Obr. 6.4 Opotřebení břitu č. 1 po 4. řezu

6.2 Obrábění břitem číslo 2

Tab. 6.2 Řezné podmínky při obrábění:

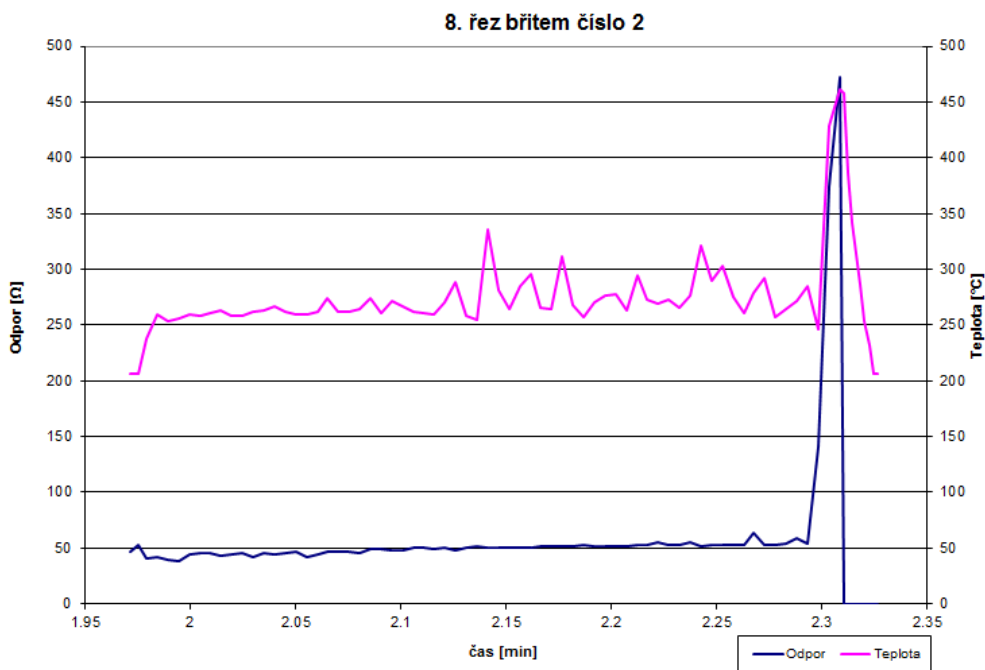
ϕd [mm]	v_c [m.min ⁻¹]	f [mm]	a_p [mm]	n [min ⁻¹]
68,3	168	0,3	1,5	800

V řezu 6 se změnil $\phi d=65,3\text{mm}$.

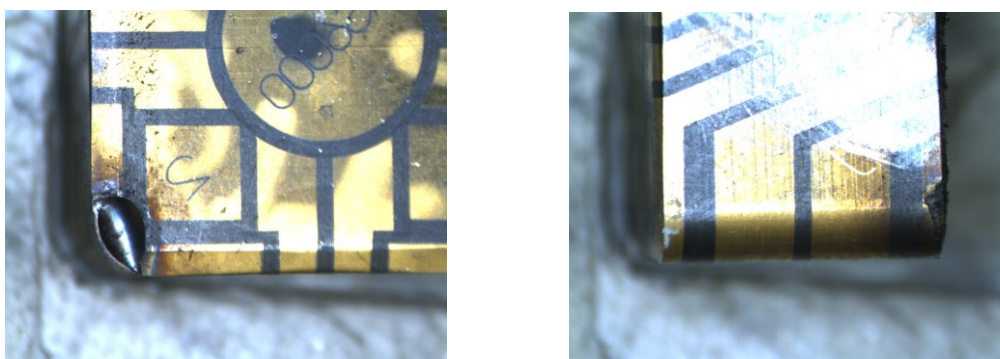


Obr. 6.5 Závislost odporu a opotřebení na čase při jednotlivých řezech

Díky pomalejšímu opotřebení břitu destičky se při obrábění břitkem číslo 2 povedlo udělat více řezů než v předchozím případě. Na obr. 6.5 je zobrazen graf, na kterém lze vidět, že výkmity elektrického odporu začínají vznikat až po 4. řezu ($L=213$ mm). V 6. a 7. řezu ($L=393$ a 475 mm) výkmit elektrického odporu překročil 60Ω a v posledním 8. řezu ($L=554$ mm) výkmit odporu překročil dokonce 140Ω . Protože v tomto řezu došlo k rychlejšímu opotřebení břitu, než v předchozích případech, byl vytvořen graf závislosti odporu a teploty na čase (obr. 6.6), který znázorňuje konkrétní průběh odporu a teploty v 8. řezu. Na konci tohoto řezu se odpor pohyboval v řádu stovek ohmů a teplota se dostala nad hodnotu 450°C . Po vyjetí z místa řezu došlo k následnému přerušení odporové vrstvy. Nástroj urazil dráhu $L=554\text{mm}$ a v záběru byl 2,3 minuty. Na obr. 6.7 je zobrazeno opotřebení břitu po 8. řezu. Vlevo lze vidět opotřebení břitu a vytvoření žlábků na čele a vpravo opotřebení hlavního ostří na hřbetu, které je $VB=0.44\text{mm}$.



Obr. 6.6 Závislost odporu a teploty na čase při obrábění břitkem č. 2

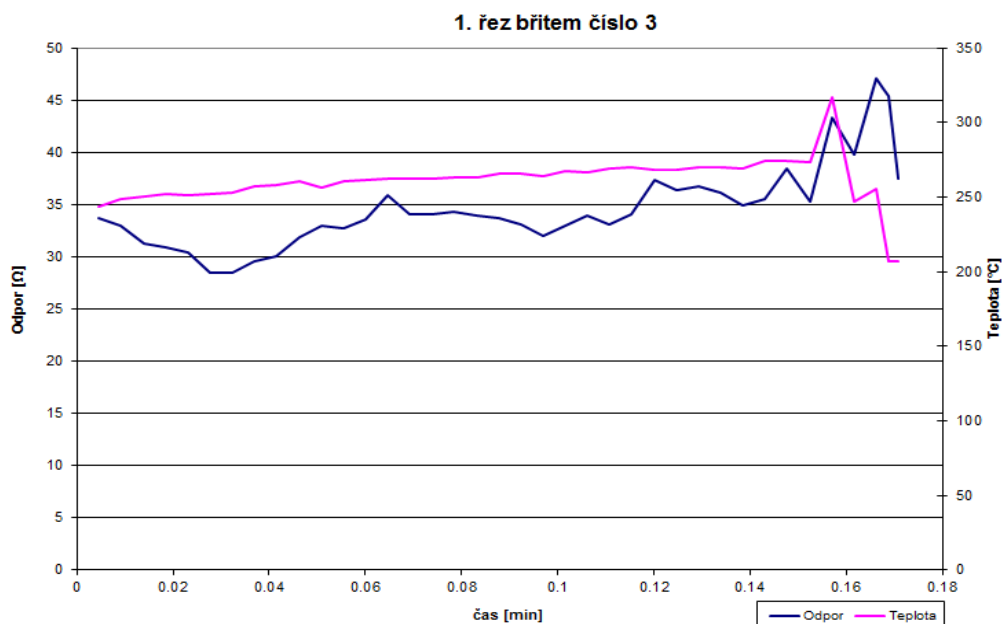


Obr. 6.7 Opotřebení břitu č. 2 po přerušení odporové vrstvy

6.3 Obrábění břitem číslo 3

Tab. 6.3 Řezné podmínky při obrábění:

ϕd [mm]	v_c [m.min ⁻¹]	f [mm]	a_p [mm]	n [min ⁻¹]
65,3	164,12	0,6	1,5	800

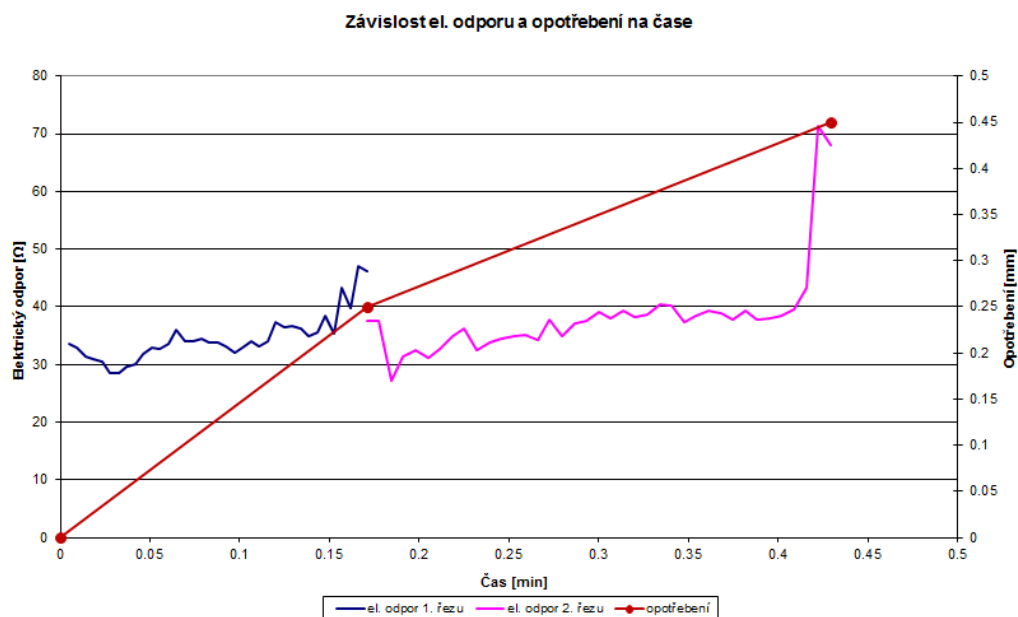


Obr. 6.8 Závislost odporu a teploty na čase při obrábění břitem č. 3

Protože se břit destičky opotřebovával rychleji v 1. řezu ($L=82$ mm) než ve 2. řezu ($L=168$ mm), je zobrazen na obr. 6.8 graf závislosti odporu a teploty na čase, na kterém je možné vidět konkrétní průběh odporu a teploty. Díky rychle rostoucímu opotřebování břitu se mění velikost plochy odporové vrstvy, která je v daném okamžiku v kontaktu s obráběným materiálem a tím se také mění elektrický odpor. Po ukončení obrábění v 1. řezu bylo opotřebování hlavního ostří na hřbetu $VB=0.25$ mm, které je zobrazeno na obr. 6.9 vpravo a vlevo lze vidět opotřebování břitu a vzniklý žlábek na čele.

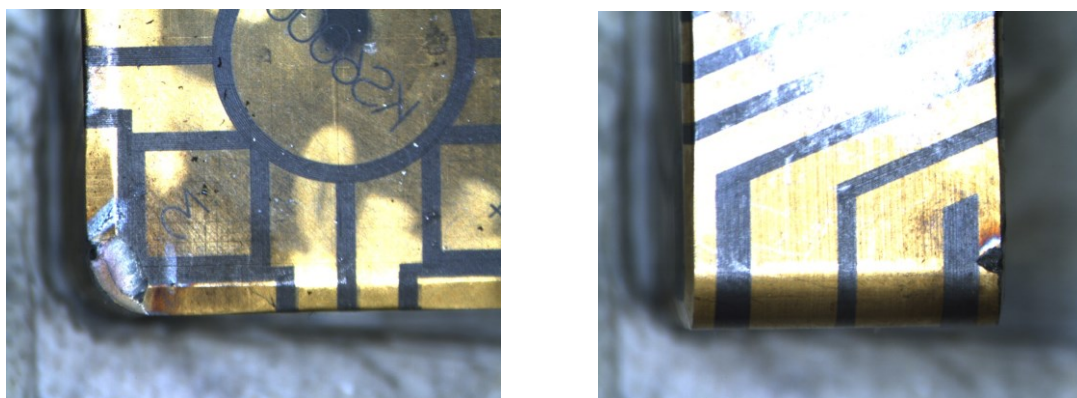


Obr. 6.9 Opotřebování břitu č. 3 po 1. řezu



Obr. 6.10 Závislost odporu a opotřebení na čase při jednotlivých řezech

Při obrábění břitem číslo 3 se destička opotřebovala velice rychle a k přerušení odporové vrstvy došlo už po dvou řezech. To je dáno tím, že řezná keramika je vhodná pro nižší posuvy a posuv, který jsme použili, je velmi vysoký. Průběh obrábění je zobrazen na obr. 6.10, kde nástroj v tomto případě urazil dráhu pouze $L=168\text{mm}$ a v záběru byl pouhých 0,43 minuty. Vzniklé opotřebení břitu je možné vidět na obr. 6.11, kde je vlevo zobrazeno opotřebení břitu a zvětšení žlábků na čele a vpravo opotřebení hlavního ostří na hřbetu. Lze si všimnout, že díky nevhodnému posuvu vzniká opotřebení ve tvaru lomu. Hodnota opotřebení břitu je $VB=0.45\text{mm}$.

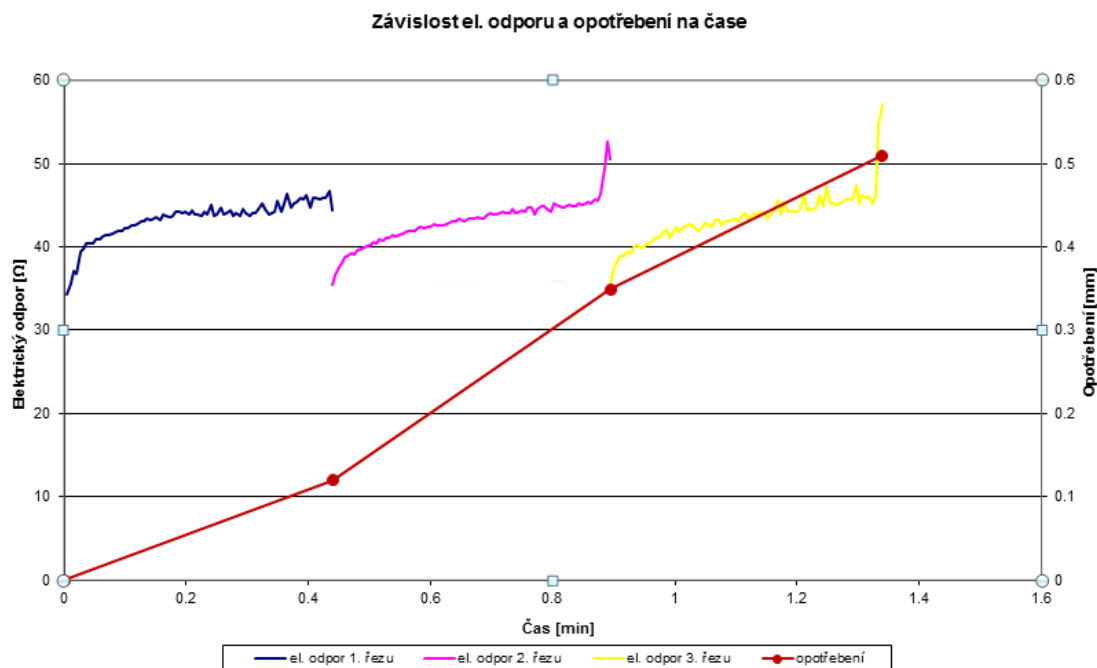


Obr. 6.11 Opotřebení břitu č. 3 po přerušení odporové vrstvy

6.4 Obrábění břitem číslo 4

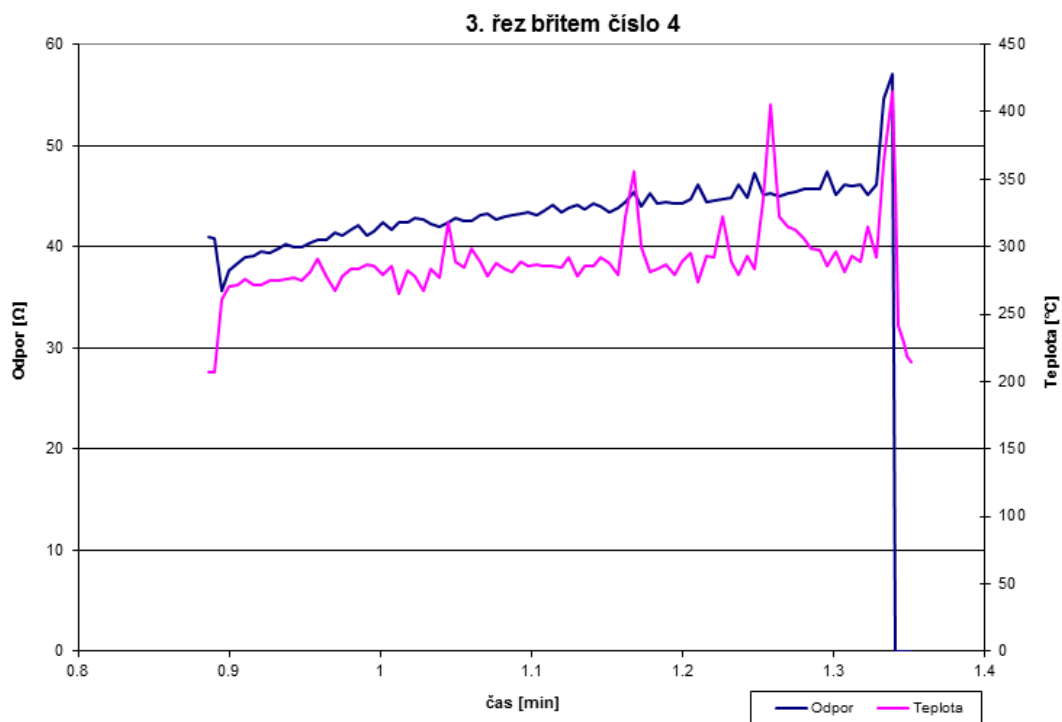
Tab. 6.4 Řezné podmínky při obrábění:

ϕd [mm]	v_c [m.min ⁻¹]	f [mm]	a_p [mm]	n [min ⁻¹]
62,4	235,24	0,15	1,5	1200

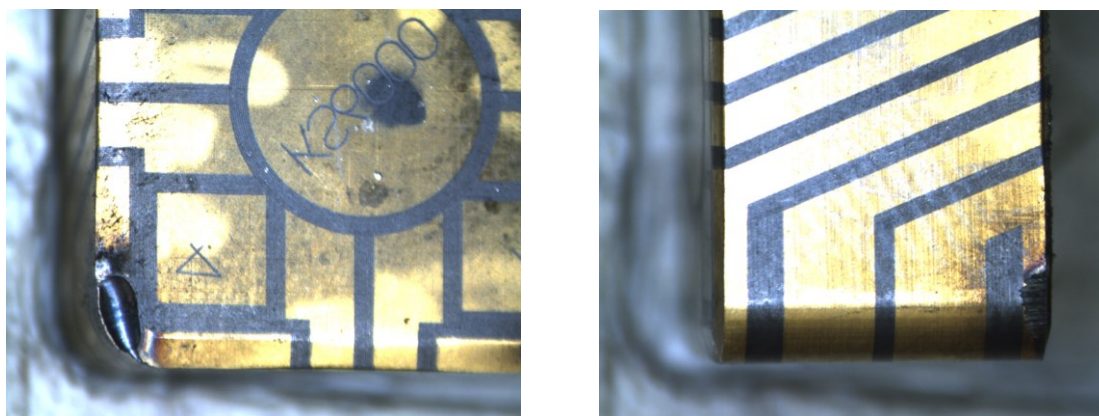


Obr. 6.12 Závislost odporu a opotřebení na čase při jednotlivých řezech

Při obrábění břitem číslo 4 se destička opotřebovala rychle a k přerušení odporové vrstvy došlo po třech řezech. Průběh obrábění je vidět na obr. 6.12, kde u 1. řezu ($L=79\text{mm}$) si lze všimnout, že nenastal žádný výkmit elektrického odporu při vyjetí nástroje z řezu, protože opotřebení břitu není velké. Výkmit elektrického odporu vzniká až u 2. řezu ($L=161\text{mm}$), kde přesáhne 50Ω a opotřebování břitu je rychlejší než v předchozím řezu. U 3. řezu ($L=241\text{mm}$) se opotřebování břitu zase zpomalí, ale zároveň se přiblíží kritické hodnotě a následně dojde k přerušení odporové vrstvy. V tomto řezu se výkmit elektrického odporu přibližuje k hodnotě 60Ω . Detailní průběh 3. řezu je zobrazen na obr. 6.13, kde si lze povšimnout jak samotného výkmitu elektrického odporu, tak také výkmitů teploty odcházející třísky, které přesahují hodnotu 400°C . Na obr. 6.14 je vlevo zobrazeno opotřebení břitu a vytvoření žlábků na čele a vpravo opotřebení hlavního ostří na hřbetu, které je $VB=0.51\text{mm}$. Nástroj při obrábění břitem číslo 4 urazil dráhu pouze $L=241\text{mm}$ a v záběru byl pouhých 1,34 minuty.



Obr. 6.13 Závislost odporu a teploty na čase při obrábění břitem č. 4



Obr. 6.14 Opotřebení břitu č. 4 po přerušení odporové vrstvy

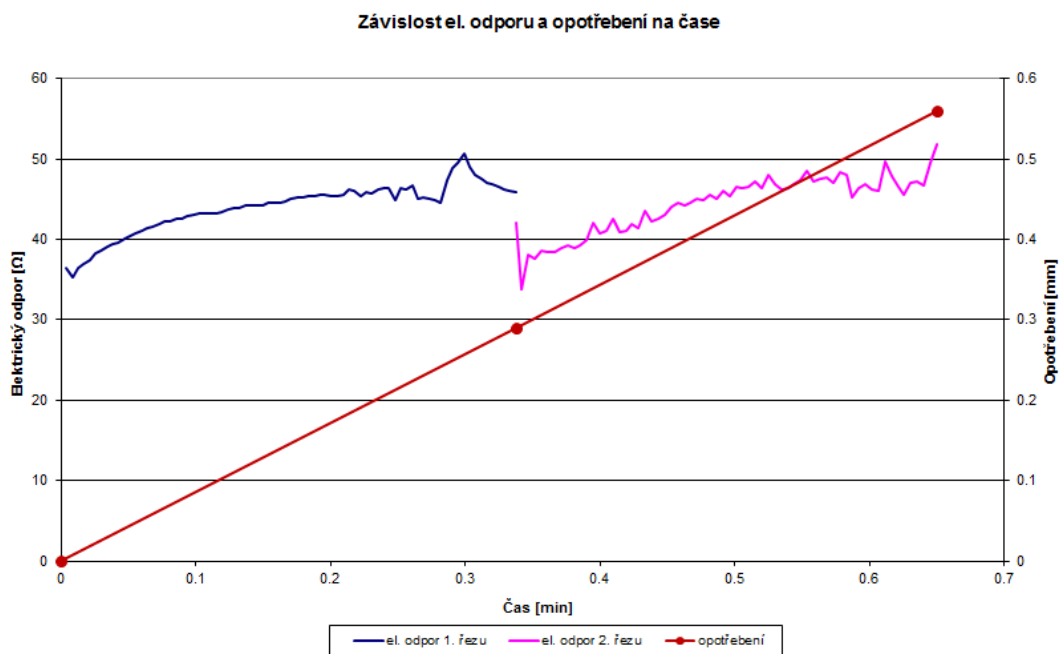
6.5 Obrábění břitem číslo 5

Tab. 6.5 Řezné podmínky při obrábění:

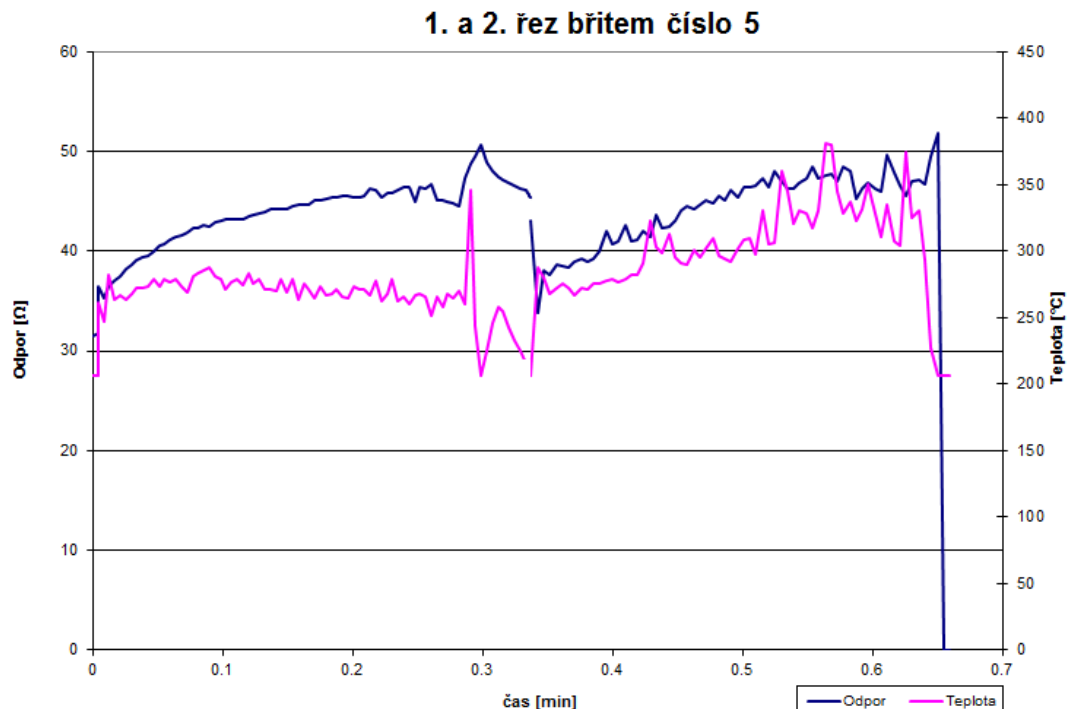
ϕd [mm]	v_c [m.min ⁻¹]	f [mm]	a_p [mm]	n [min ⁻¹]
62,4	313,5	0,15	1,5	1600

Při obrábění břitem číslo 5 se rovněž destička velice rychle opotřebovala jako u předešlých dvou případů a k přerušení odporové vrstvy došlo po dvou řezech. Průběh obrábění je zobrazen na obr. 6.15, na kterém lze vidět, že při obou řezech se hodnoty odporu pohybovaly mezi 40-50Ω a nastaly pouze malé výkmity elektrického

odporu, které lehce přesáhly 50Ω při vyjetí nástroje z řezu. Jednou z příčin může být plynulé a zároveň rychlé opotřebování břitu nástroje. Nástroj při obrábění urazil dráhu pouhých $L=156\text{mm}$ a v záběru byl 0,65 minuty.



Obr. 6.15 Závislost odporu a opotřebení na čase při jednotlivých řezech

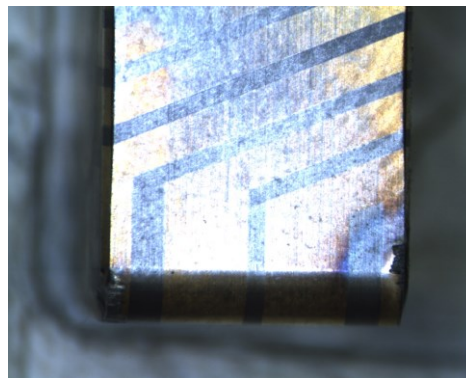
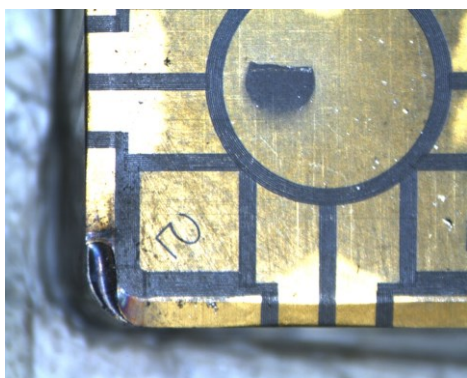


Obr. 6.16 Závislost odporu a teploty na čase při obrábění břitem č. 5

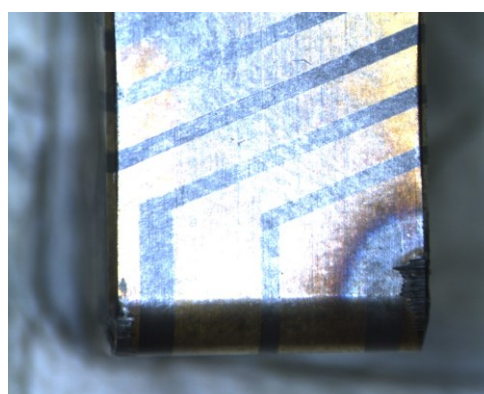
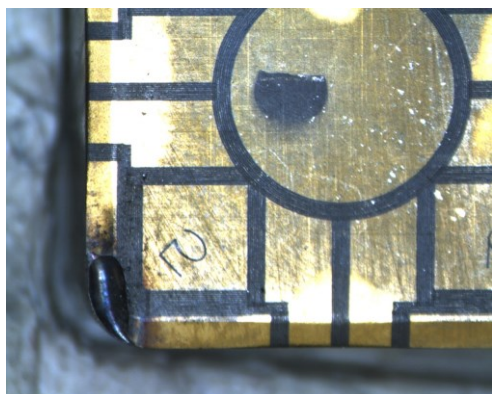
Protože opotřebování břitu bylo během obrábění břitem číslo 5 rovnoměrné, je na obr. 6.16 znázorněn graf závislosti odporu a teploty na čase, kde lze vidět průběh

odporu a teploty při obrábění břitem číslo 5. V prvním řezu se teplota pohybuje mezi 250 až 300°C, a protože opotřebení břitu není velké, nenastávají výkmity odporu. V druhém řezu už teplota přesáhne 300°C a v jednom místě dosáhne skoro 400°C. Po vyjetí z místa řezu byla naměřena nulová hodnota elektrického odporu.

Na obr. 6.17 je zobrazeno opotřebení břitu po prvním řezu. Vlevo lze vidět opotřebení na čele a vpravo opotřebení hlavního ostří na hřbetu nástroje. Hodnota opotřebení je $VB=0,29\text{mm}$. Na dalším obrázku (obr. 6.18) lze vlevo vidět opotřebení břitu a zvětšení žlábků na čele a vpravo opotřebení hlavního ostří na hřbetu, které se zvýšilo na hodnotu $VB=0,56\text{mm}$. Na pravém obrázku si můžeme všimnout, že destička byla tepelně namáhána.



Obr. 6.17 Opotřebení břitu č. 5 po 1. řezu

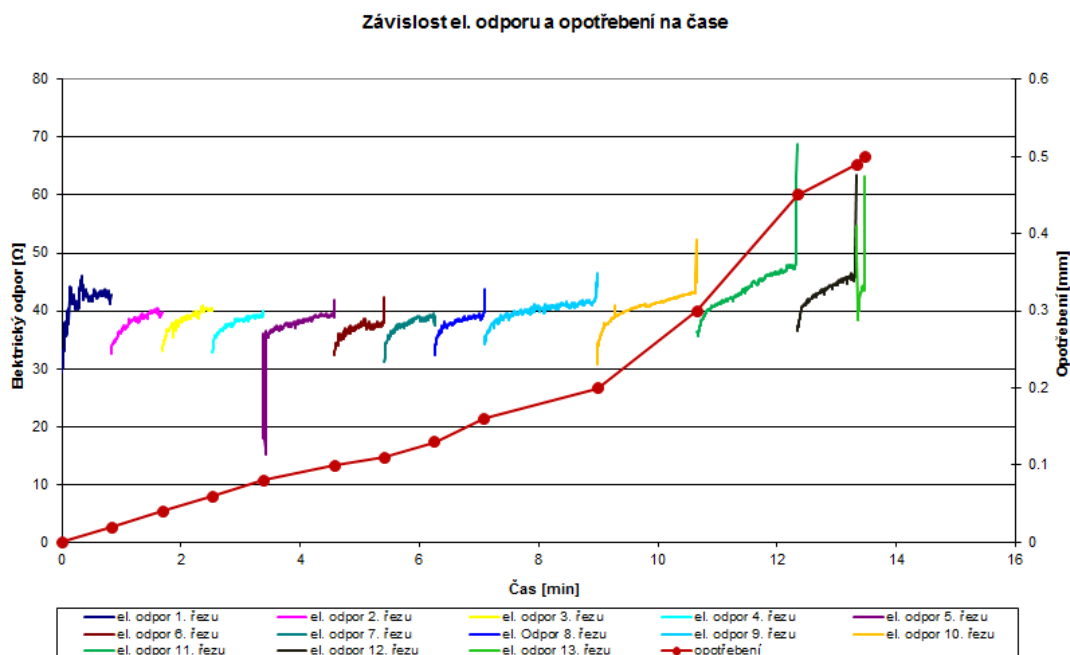


Obr. 6.18 Opotřebení břitu č. 5 po přerušení odporové vrstvy

6.6 Obrábění břitem číslo 6

Tab. 6.6 Řezné podmínky při obrábění:

ϕd [mm]	v_c [m.min ⁻¹]	f [mm]	a_p [mm]	n [min ⁻¹]
59,3	107,37	0,15	1,5	630

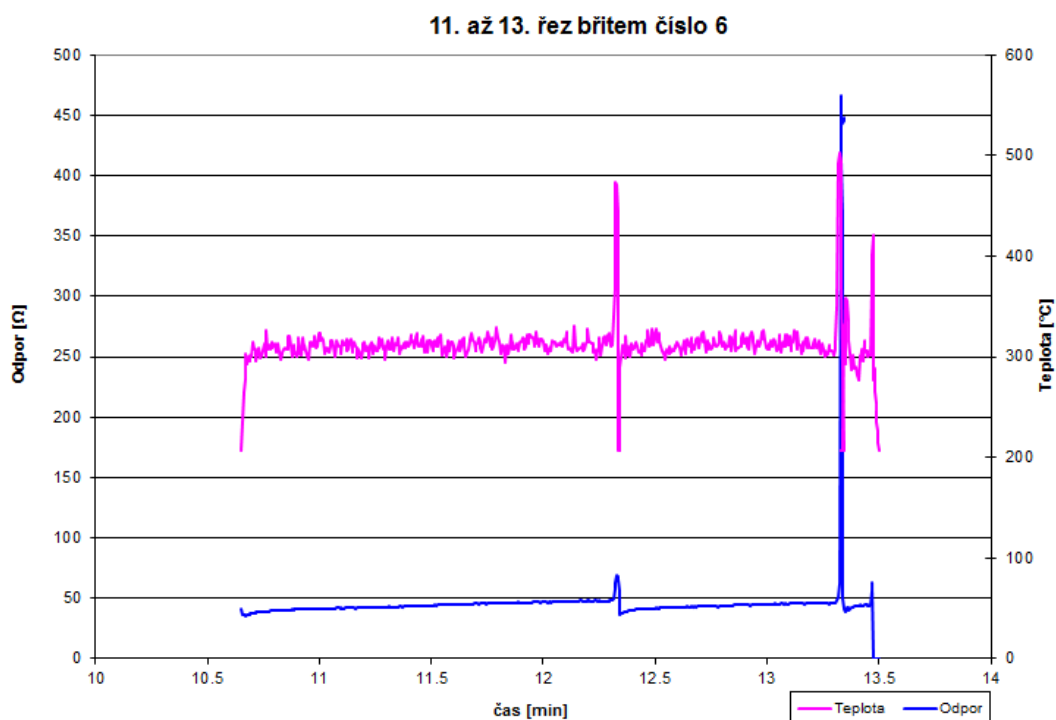


Obr. 6.19 Závislost odporu a opotřebení na čase při jednotlivých řezech

Při obrábění břitkem číslo 6 se destička opotřebovala pomalu a k přerušení odporové vrstvy došlo až po 13 řezech. Průběh obrábění lze vidět na obr. 6.19. U prvních čtyř řezů ($L=0÷319\text{mm}$) nenastávaly žádné výkmity elektrického odporu a destička se pomalu a zároveň plynule opotřebovávala. Při řezech 5 až 9 ($L=432÷849\text{mm}$) nastávají první drobné výkmity elektrického odporu, které ale nepřesahují hodnotu 50Ω . Od 10. řezu ($L=1007\text{mm}$) se začínají objevovat velké výkmity elektrického odporu, které přesahují 50Ω . Jedním z příčin vzniku těchto výkmitů elektrického odporu je opotřebení břitu nástroje, které je od tohoto řezu rychlejší než v předchozích řezech. V řezu č. 11 ($L=1166\text{mm}$) dokonce výkmit elektrického odporu dosahuje 70Ω a opotřebení břitu nástroje je zde nejrychlejší. V řezu č. 13 pak opotřebení dosáhne kritické hodnoty a odporová vrstva se přerušila. Nástroj při obrábění břitkem č. 6 urazil dráhu $L=1273\text{mm}$ a v záběru byl 13,47 minuty.

Protože v 11. řezu je opotřebování břitu nástroje nejrychlejší z celého obrábění, je na obr. 6.20 vykreslen graf závislosti odporu a teploty na čase z 11. až 13. řezu břitkem číslo 6, na kterém lze vidět konkrétní průběh odporu a teploty při obrábění. Na začátku 11. řezu je hodnota opotřebení břitu $VB=0,3\text{mm}$ a v průběhu řezu se rychle zvětšuje a tím se pomalu zvětšuje i elektrický odpor. Po ukončení řezu byla naměřena hodnota opotřebení břitu $VB=0,45\text{mm}$. V průběhu 12. řezu se hodnota přiblížila kritické hodnotě. Těsně před přerušením elektrického obvodu byl řez

ukončen a při výjezdu nástroje z místa řezu byl naměřen výkmit elektrického odporu, jehož hodnota přesáhla 450Ω . Rovněž nastal výkmit teploty, jejíž hodnota dosáhla skoro 500°C . Hodnota opotřebení břitu činila $VB=0,49\text{mm}$. Následoval 13. řez, ve kterém se elektrický obvod přerušil, po výjezdu nástroje z místa řezu byl naměřen nulový odpor. Vzniklé opotřebení břitu nástroje je zobrazeno na obr. 6.21, kde vlevo lze vidět opotřebení břitu a vytvořený žlábek na čele a vpravo opotřebení hlavního ostří na hřbetu, jehož hodnota byla $VB=0,5\text{mm}$.



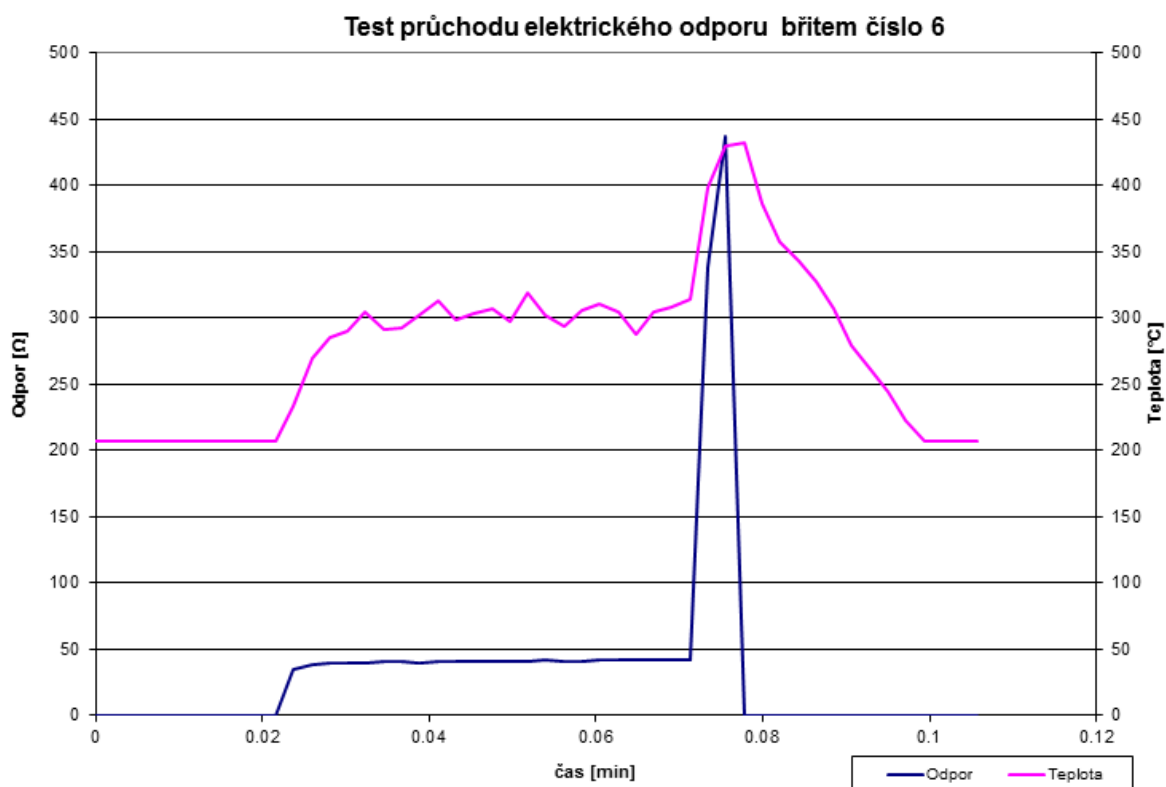
Obr. 6.20 Závislost odporu a teploty na čase při obrábění břitem č. 6



Obr. 6.21 Opotřebení břitu č. 3 po přerušení odporové vrstvy

Po přerušení elektrického obvodu a pečlivém zaznamenání všech potřebných dat byl proveden ještě jeden řez, který probíhal břitem č. 6 a řezné podmínky byly použity stejné jako v předešlých řezech. Cílem tohoto řezu bylo zjistit, zda materiál obrobku

přenáší elektrický odpor při obrábění i po dosažení kritické hodnoty opotřebení. Před příjezdem do místa řezu byla hodnota elektrického odporu nulová a při následném obrábění se elektrický odpor přiblížil hodnotám, které byly naměřeny v předešlých řezích. Po vyjetí z místa řezu se hodnota odporu vrátila na nulovou hodnotu. Díky tomuto výsledku lze říci, že přerušení elektrického obvodu a dosažení hodnoty opotřebení na vyměnitelné břitové destičce je zjištěno až po vyjetí z řezu. Průběh tohoto řezu je zobrazen na obr. 6.22.



Obr. 6.22 Závislost odporu a teploty na čase při testu průchodu odporu

7. Závěr

V této bakalářské práci bylo cílem sledovat chování elektrického odporu při obrábění pomocí vyměnitelné břitové destičky z nitridické keramiky, která má nanesenou odporovou vrstvu. Při experimentu byl použit jeden materiál (17 601).

V prvních třech měřeních se měnil posuv a snahou bylo udržet řeznou rychlost při obrábění konstantní. Protože se ale během obrábění měnil obráběný průměr, nastala mírná změna řezné rychlosti. Při obrábění břitem č. 1 jsme provedli celkem 5 řezů, kdy nástroj urazil celkovou dráhu 524 mm a v záběru byl 4,37 minuty. Posuv byl 0,15mm a řezná rychlost byla $179,2 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$. Při obrábění břitem č. 2 se změnil posuv na hodnotu 0,3mm a řezná rychlost se pohybovala $168 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$. Celkově jsme provedli 8 řezů a nástroj urazil 554mm a v záběru byl 2,3 minuty. Při obrábění břitem č. 3 jsme celkově provedli pouze 2 řezy a nástroj urazil 168mm a v záběru byl pouhých 0,43 minuty. Posuv jsme zvedli na 0,6 mm a řezná rychlost byla 164 m/min. Nástroj se velice rychle opotřebil, protože jsme nastavili vysoký posuv, na který řezná keramika není vhodná.

Ve třech dalších měřeních se měnila řezná rychlost. Hodnota posuvu v dalších měřeních zůstala konstantní. Její hodnota byla 0,15mm. Při obrábění břitem č. 4 byla zvolena řezná rychlost $235 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$. Na přerušení odporové vrstvy stačily 3 řezy, poté byl naměřen nulový odpor. Nástroj urazil dráhu 241mm a v záběru byl pouhých 1,34 minuty. Při obrábění břitem č. 5 nástroj urazil nejkratší dráhu a to 156mm a v záběru byl 0,65 minuty. Hodnota řezné rychlosti byla zvýšena na $313 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$. K přerušení odporové vrstvy došlo už po 2. řezu. U obou předchozích řezů je jedním z příčin rychlého přerušení odporové vrstvy zvolená vysoká řezná rychlost. Obrábění břitem č. 6 bylo nejdelší z celého experimentu. Hodnota řezné rychlosti se pohybovala okolo $107,37 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ a k přerušení odporové vrstvy došlo po 13 řezech. Nástroj urazil celkově dráhu 1273mm a v záběru byl 13,47minuty. Nakonec byl proveden řez, jehož cíle bylo zjistit, zda obrobek přenáší elektrický odpor. Ten se po najetí do místa řezu dostal na přibližně stejné hodnoty, které jsme naměřili před přerušením elektrického obvodu. Díky tomuto řezu jsme zjistili, že **přerušení elektrického obvodu a dosažení hodnoty opotřebení na destičce lze zjistit až po vyjetí nástroje z místa řezu.**

Z výsledků, ke kterým jsme došli během experimentu, můžeme potvrdit možnost využití vyměnitelné břitové destičky s nanesenou odporovou vrstvou při obrábění.

Pomocí této metody lze sledovat narůstající opotřebení. Pokud se začínají objevovat výkmity elektrického proudu při výjezdu z místa řezu a ty se u následujících výjezdů zvyšují, lze předpokládat vznik většího opotřebení nástroje. Před dosažením kritické hodnoty opotřebení může výkmit elektrického proudu dosahovat až stovek ohmů. Po takto velkém výkmitu dochází k přerušení odporové vrstvy a k následnému naměření nulové hodnoty elektrického odporu. Toto je signál, že destička byla opotřebena a musí se vyměnit. Jak jsme si ověřili při obrábění břitem číslo 3, 4 a 5 je tato metoda vhodná při použití nestandardních řezných podmínek, protože k opotřebení břitu destičky dochází velmi rychle. Tuto metodu by ocenili i ve velkosériové výrobě. Protože zde hraje velkou roli čas výroby, je zde zájem o co nejkratší vedlejší časy. Pokud výroba probíhá pomocí cnc strojů, jednou z metod pro sledování opotřebení nástroje je pomocí měřicí sondy. V této metodě je velký vedlejší čas, protože nástroj musí přejet k této sondě, proběhne samotné měření a následně musí zase přejet zpět. Oproti tomuto má velkou výhodu metoda, kterou jsme použili v experimentu, protože zde neexistují žádné přejezdy, ale stačí pouze ukončit řez a vyjet nástrojem z místa řezu. Z tohoto důvodu je reálné, že v budoucnu se začne tato metoda velice hojně používat v běžné výrobě.

Testování odporové vrstvy je velmi rozsáhlé téma a proto v této práci nebylo možné sledovat podrobně opotřebení a teplotu při obrábění vyměnitelnou břitovou destičkou. Těmito jevy zabývají se další dva kolegové ve svých bakalářských pracích.

Použitá literatura

- [1] HUMÁR, A. *Technologie i technologie obrábění: 1. část*. Brno: VUT v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2003. 138 s. Studijní opory pro magisterskou formu studia "Strojírenská technologie".
- [2] BRYCHTA, J., CEP, R., NOVÁKOVÁ, J., PETRKOVSKÁ, L., *Technologie 2: 1. díl*. Ostrava: VŠB, 2007. 119s. ISBN 978-80-248-1641-8
- [3] KOČMAN, K., PROKOP, J. *Technologie obrábění*. 2.vyd. Brno: VUT, 2001. 270s. ISBN 80-214-3068-0
- [4] HUMÁR, Anton. *Materiály pro rezné nástroje*. Praha : MM publishing, s.r.o., 2008. 235 s.
- [6] MRKVICA, Ivan. *Návody ke cvičení z obráběcích strojů 1. část*, VŠB TECHNICKÁ UNIVERZITA OSTRAVA, Ostrava 2006, 148 s., ISBN 80-248-1053-0
- [7] KOČMAN, Karel; PROKOP, Jaroslav. *Technologie obrábění*. 2. vydání. Brno: Akademické nakladatelství CERM Brno s.r.o., 2005. 270 s.
- [8] *Katalog soustružení Pramet. Šumperk* : Pramet Tools,s.r.o., 2010. 328 s
- [9] FUKA,J., HAVELKA B. *Elektřina a magnetismus*. NCSAV Praha 1956. 142s
- [10] NESLUŠAN, M.; TUREK, S.; BRYCHTA, J.; CEP, R.; TABACEK, M. *Experimentálne metódy v trieskovom obrábaní*. Žilina: EDIS Žilina, 2007. s. 343. ISBN 978–80–8070–711–8.
- [11] KRATOCHVÍL, Jiří. *Metodika sledování opotřebení keramických nástrojů pomocí odporových vrstev během řezu*. Ostrava, 2010. 118 s. Dizertační práce. VŠB – Technická univerzita Ostrava.
- [12] HUMÁR, A. *Slinuté karbidy a řezná keramika pro obrábění*. Brno: CCB, 1995. 256s. ISBN 80-85825-10-4.
- [13] VASILKO, K.; NOVÁK-MARCINCIN, J.; HAVRILA, M. *Výrobné inžinierstvo*. Prešov : Datapress Prešov. 2003, 424 s. ISBN 80–7099–995–0.